

DAS SCHÜLERVORVERSTÄNDNIS ZUR MECHANIK

Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II
unter Einbeziehung historischer und
wissenschaftstheoretischer Aspekte

vorgelegt dem Fachbereich 1 (Physik/Elektrotechnik)
der Universität Bremen zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr.rer.nat.)

von
HORST SHECKER
Bremen

Bremen
Oktober 1985

DAS SCHÜLERVORVERSTÄNDNIS ZUR MECHANIK

Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II
unter Einbeziehung historischer und
wissenschaftstheoretischer Aspekte

vorgelegt dem Fachbereich I (Physik/Elektrotechnik)
der Universität Bremen zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr.rer.nat.)

von

HORST SCHECKER

Bremen

Tag des öffentlichen Kolloquiums:

10. Dezember 1985

Gutachter der Dissertation:

Prof. Dr. H. Niedderer

Prof. Dr. St. v. Aufschnaiter

Abstract

In der vorliegenden Arbeit werden Forschungsergebnisse über Dispositionen vorgelegt, auf deren Grundlage Schüler der Sekundarstufe II sich mit Phänomenen und Begriffen der klassischen Mechanik auseinandersetzen. Die Gesamtheit der Dispositionen, die das Denken und Handeln in einem bestimmten Theorie- oder Phänomenbereich anleiten, wird als das "Vorverständnis" bezeichnet. Das Forschungsziel besteht in der Ergründung der Tiefenstruktur des Zugriffs von Schülern auf mechanische Sachverhalte, d.h. des charakteristischen gemeinsamen Kerns verbreiteter Vorverständniselemente. In der Arbeit werden Aussagen über die Typik des Schülerverhaltens erarbeitet, die es ermöglichen, den Ablauf von Unterrichtsstunden über Mechanik in der Sekundarstufe II plausibel aus einer Wechselwirkung zwischen Elementen des "thematischen Vorverständnisses" und äußeren Gegebenheiten der Handlungssituation zu erklären. Dies wird an ausführlichen Fallstudien demonstriert.

Die Ergebnisse der Arbeit beruhen auf Unterrichtsprotokollen, die fortlaufend durch Unterrichtsbeobachtungen und Tonbandaufzeichnungen der Unterrichtsgespräche in Physikkursen der gymnasialen Oberstufe erstellt wurden (Umfang circa 700 Seiten), und einer Palette schriftlicher Erhebungen mit Assoziations- und Verständnistests an größeren Schülerpopulationen. Bei der Konstruktion der Vorverständniselemente wurden jeweils Daten aus verschiedenen empirischen Erhebungen miteinander verzahnt. Mit der Postulierung verhaltensrelevanter Dispositionen wird die reine Deskription überschritten. Durch die Explizierung des theoretischen Rahmens und des Zustandekommens der Interpretationsannahmen (Vorverständniselemente) wird die Analyse des Schülerverhaltens auf eine systematische Grundlage gestellt. Interpretationen bauen nicht mehr vorwiegend auf Intuition und hermeneutischem Geschick auf, sondern können sich an einem Diagnoseschema orientieren.

Vor der Darlegung der empirischen Ergebnisse wird der begriffliche und forschungsmethodologische Rahmen aufgespannt. Das Konzept "Vorverständnis" wird in seinen Querverbindungen zu philosophischen, wissenschaftstheoretischen und anderen didaktischen Konzepten erläutert.

In einem weiteren Abschnitt werden wissenschaftstheoretisch-historische Ausführungen zur Genese des physikalischen Kraftbegriffs gemacht. Auswahlkriterien für die behandelten Aspekte sind dabei Parallelen zu Elementen des Schülervorverständnisses, die sich sowohl auf begriffsspezifische Vorstellungen beziehen als auch auf generelle Merkmale des Zugriffs auf Naturphänomene.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Kapitel A	
DAS VORVERSTÄNDNIS	
Ein Konstrukt für die Analyse von Erkenntnisprozessen	
A.1	7
A.1.1	8
A.1.2	12
A.1.3	18
A.1.4	21
A.1.5	25
A.2	32
A.2.1	33
A.2.2	49
A.2.3	68
A.3	81
A.3.1	82
A.3.2	85
A.3.3	90
Kapitel B	
DAS THEMATISCHE VORVERSTÄNDNIS ZUR MECHANIK	
Empirische Basis und Ergebnisse	
B.1	93
B.2	95
B.2.1	98
B.2.1.1	98
B.2.1.2	100
B.2.2	104
B.2.2.1	104
B.2.2.2	110
B.2.3	119
B.3	123
B.3.1	124
B.3.2	128
B.3.2.1	128

III

B.3.2.1.1	Denkrahmen 1: Realisationsdenken	136
B.3.2.1.2	Allgemeines Interesse 1: Interesse an Phänomenen an sich/ Denkrahmen 2: Aufgabe der Physik: Realitätserfahrungen erklären	153
B.3.2.1.3	Denkrahmen 3: Physik beschreibt ideale Laborwelten	166
B.3.2.1.4	Denkrahmen 4: Physik liefert eindeutige Ergebnisse	177
B.3.2.2	Bereich 2: Problemlösungsverhalten/Denkstrategien	187
B.3.2.2.1	Denkrahmen 5: Eigenschaftsdenken	188
B.3.2.2.2	Denkrahmen 6: Verursacher-Fixierung/Aktivitätsdenken	192
B.3.2.2.3	Denkrahmen 7: Zweckdenken	197
B.3.2.2.4	Denkrahmen 8: Formelfixierung	199
B.3.2.2.5	Denkrahmen 9: Analogiedenken	208
B.3.2.2.6	Denkrahmen 10: Ursprungseinbeziehung/globales Denken	211
B.3.2.3	Bereich 3: Schwerpunkte allgemeiner Interessen	220
B.3.2.3.1	Allgemeines Interesse 2: Interesse an Erkenntnisprodukten	221
B.3.2.3.2	Allgemeines Interesse 3: Interesse an technischen Fragestellungen	229
B.3.2.3.3	Allgemeines Interesse 4: Interesse am Experimentieren	238
B.3.3	Vorverständniskomponente II: Präkonzepte und spezifische Interessen (P/SI)	243
B.3.3.1	Bereich I: Kinematik	243
B.3.3.1.1	Spezifisches Interesse 1: Interesse an der Dynamik von Bewegungen	243
B.3.3.1.2	Präkonzept 1: Geschwindigkeit als Schnelligkeit	254
B.3.3.1.3	Präkonzept 2: Beschleunigung als Bilanzgröße	264
B.3.3.2	Bereich 2: Dynamik	270
B.3.3.2.1	Präkonzept 3: Kraft als allgemeine Wirkungsfähigkeit	270
B.3.3.2.2	Präkonzept 3-1: Bewegte Körper haben Kraft	286
B.3.3.2.3	Präkonzepte 3-2 und 3-3: Kraft und Bewegungsantrieb	295
B.3.3.2.4	Präkonzept 4: Kraftausübung als Aktivität	311
B.3.3.2.5	Präkonzept 5: Kopplung von Trägheit, Gewicht und Reibung	321
B.3.4	Vorverständniskomponente III: Erfahrungen und Kenntnisse (E/K)	328
B.3.4.1	Erfahrung 1: Bewegungswiderstände	329
B.3.4.2	Erfahrung 2: Kurvenfahrten/ Präkonzept 6: Bei Kreisbewegungen wirkt eine Kraft nach außen	330
B.3.4.3	Kenntnis 1: Erdbeschleunigung ist höhenabhängig	337
B.4	<u>Das thematische Vorverständnis zur Mechanik (Kompaktdar- stellung)</u>	339

Kapitel C

INTERNATIONALER FORSCHUNGSSTAND und EINORDNUNG DER EIGENEN EMPIRISCHEN ERGEBNISSE

C.1	Einleitung	344
C.2	<u>Untersuchungen über Schülervorstellungen zur Mechanik</u>	347
C.2.1	Warren (1979)	349
C.2.2	Viennot (1979)	353
C.2.3	Clement (1982)	357
C.2.4	Trowbridge (1980/81)	359
C.2.5	Arons (1981)	364
C.2.6	Champagne (1980)	366

IV

C.2.7	McCloskey (1983)	369
C.2.8	Leboutet-Barrell (1976)	371
C.2.9	Whitaker (1983)	372
C.2.10	Watts (1983)	374
C.2.11	Schenk (1983)	374
C.2.12	Jung (1981)	378
C.3	<u>Tabellarischer Überblick über die Kernaussagen der referierten Studien</u>	387
C.4	<u>Einordnung der eigenen Arbeiten in den internationalen Forschungsstand</u>	391
C.4.1	Generelle Einschätzung	392
C.4.2	Präkonzepte	392
C.4.3	Denkrahmen	395
C.4.4	Interessen	396
C.4.5	Methodik	398

Kapitel D

ZUR GENESE DES KRAFTBEGRIFFS

Historische und wissenschaftstheoretische Ausführungen

D.1	Einleitung	400
D.2	<u>Entwicklungsstufen der Mechanik mit Bezug zum Schülervorverständnis</u>	403
D.2.1	Die Bewegungslehre des Aristoteles	405
D.2.2	Impetustheorie	410
D.3	<u>Übergang von der aristotelischen zur galileisch-newtonschen Physik - Eine neue Art der Erkenntnisgewinnung</u>	417
D.3.1	Einleitung	418
D.3.2	Sieben einführende Thesen	419
D.3.3	Die neue Erkenntnisweise der galileisch-newtonschen Physik	420
D.3.4	Exkurs: Galileis Bewegungslehre und die Beschreibung des freien Falls	423
D.3.5	Die neue Erkenntnisweise der galileisch-newtonschen Physik (Forts.)	442
D.3.6	Didaktische Relevanz der Ergebnisse	455
D.3.6.1	Schüleraussagen zum Sinn von Abstraktionen und Gedankenexperimenten	455
D.3.6.2	Schüleraussagen zum ersten Newtonschen Axiom	462
D.4	<u>Zur Entwicklung des Kraftbegriffs nach der Veröffentlichung von Newtons 'Principia'</u>	467
D.4.1	Einleitung	468
D.4.2	Erörterung	469
D.4.3	Zusammenfassung und didaktische Wertung	487

Kapitel E

FALLSTUDIEN ZUM SCHÜLERVERHALTEN

IM MECHANIKUNTERRICHT DER SEKUNDARSTUFE II

E.1	Einleitung	490
E.2	Fallstudie I: Einführung des Trägheitsprinzips	491

E.3	Fallstudie 2: Schülerverhalten in einem SVU über Stoßvorgänge	514
E.4	Fallstudie 3: Wechselwirkungskräfte	530
	Literaturverzeichnis	542
	Liste der verwendeten Abkürzungen	548

Einleitung

In der vorliegenden Arbeit werden Forschungsergebnisse über Dispositionen vorgelegt, auf deren Grundlage Schüler der Sekundarstufe II sich mit Phänomenen und Begriffen der klassischen Mechanik auseinandersetzen. Wir nennen die Gesamtheit der Denkrahen, Präkonzepte, Interessen usw., die das Denken und Handeln in einem bestimmten Theorie- oder Phänomenbereich anleiten, das Vorverständnis. Das Forschungsziel besteht in der Ergründung der Tiefenstruktur des Zugriffs von Schülern auf mechanische Sachverhalte, d.h. des charakteristischen gemeinsamen Kerns verbreiteter Vorverständniselemente. Das angestrebte Ergebnis besteht in Aussagen über die Typik des Schülerverhaltens, die es ermöglichen, den Ablauf von Unterrichtsstunden (Beobachtungen, Beschreibungen und Interpretationen von Phänomenen durch Schüler, Test-Bearbeitungen, Lehrer-Schüler-Interaktionen) plausibel aus einer Wechselwirkung zwischen Elementen des thematischen Vorverständnisses und äußeren Gegebenheiten der Handlungssituation zu erklären. Durch das Aufzeigen von Grundmustern der Verhaltensdispositionen gelangt man zu einer weitergabefähigen Menge von Denkrahen, Präkonzepten, Interessen usw. die übersichtlich und begrenzt genug ist, um eine Orientierungshilfe für Unterrichtende darstellen zu können.

Die Erforschung von Schülervorstellungen ist eines der zentralen Arbeitsgebiete der aktuellen Physikdidaktik. Davon zeugen das Seminar "Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht", das vom Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) 1982 in Kiel durchgeführt wurde, und das "International Seminar on Misconceptions in Science and Mathematics" 1983 an der Cornell-Universität in Ithaca. Nach einer Phase, in der Sachstrukturanalyse, Curriculum-Entwicklung und Lehrmedien im Mittelpunkt des Interesses standen, wird zunehmend der Lernende als entscheidende Determinante des Lehr-/Lernprozesses wahrgenommen. Seine "kognitive Struktur", seine "Vorstellungen", sein "Vorverständnis" gilt es zu erforschen, wenn man Aufschlüsse über die Verarbeitung angebotener Lehrinformationen und über den Aufbau von Wissensstrukturen beim Lerner erhalten will. Aufschnaiter (1983) spricht von einem sich entwickelnden "Kind-Paradigma" der Fachdidaktik mit Forschungsprogrammen zur Analyse des Denkens und Handelns von Schülern in konkreten Lernumwelten.

Eine Grundthese der Forschungsrichtung lautet: "Verständnisschwierigkeiten entstehen durch nicht antizipierte Wechselwirkungen zwischen dem Lehrangebot und den Schülervorstellungen" (vgl. Jung 1981a, 19). Wir erweitern die These und sagen: "Verständigungsschwierigkeiten im Physikunterricht entstehen dadurch, daß der Lehrer nicht erkennt, auf welchen Vorverständniselementen vordergründig

schlicht falsch erscheinende Schüleraussagen beruhen". Nur wenn der Lehrer sich in die Denkweisen der Schüler hineinversetzen kann, ist es ihm möglich, einem Schüler in einem Lehrgespräch Anstöße und Hilfen dafür zu geben, neue Informationen mit seinem Vorverständnis zu verknüpfen, bzw. von vorhandenen Elementen abzugrenzen - eine Erkenntnisleistung, die letztlich nur der Schüler selbst vollziehen kann.

Es erhebt sich die Frage, welche Forschungsv Verfahren unserer Zielsetzung adäquat sind und in welcher Form die Ergebnisse vermittelt werden können. Künzli hat in einem Plenarvortrag auf der Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik 1984 in Hannover zum Methodenproblem der Naturwissenschaftsdidaktik Stellung genommen. Angesichts der Komplexität und Dynamik des sozialen Systems Unterricht, das nicht kausalgesetzlich zu erfassen sei, empfiehlt Künzli den Verzicht auf durchgängige Standards der Verallgemeinerbarkeit.

Statt dessen wäre eine von mehr oder weniger zufälligen, aber sich als fruchtbar erweisenden Ereignissen auszugehen und sich auf eine Sammlung von typisierbaren Lehrsituationen und Problembeschreibungen samt einer entsprechenden Verfeinerung der Deutungs- und Diagnosemöglichkeiten hinzuarbeiten. Dazu gehörte sicher auch die Erstellung eines diagnostischen Handbuches von Schülervorstellungen über Naturphänomene."
(Künzli 1985, 67)

In eine so verstandene Fachdidaktik läßt sich unser Forschungsansatz nach Perspektive und Methodologie einordnen. Ausgehen von Beobachtungsdaten aus laufendem Physikunterricht gelangen wir zu einer Sammlung von Lehr-/Lernsituationen, die aus verschiedenen Gründen interessant sein können: auffällige Lernschwierigkeiten, Kommunikationsprobleme zwischen Lehrer und Schülern oder den Schülern untereinander, Festhalten von Schülern an alternativen (z.B. alltagspraktischen) Phänomenbeschreibungen oder -deutungen, erkennbare Unzufriedenheit mit dem Unterrichtsverlauf auf seiten des Lehrer und/oder der Schüler. (Die dieser Arbeit zugrundeliegende Datenbasis enthält rund 700 Seiten Wort- und Unterrichtsprotokolle aus Physikkursen der gymnasialen Oberstufe.) Die dokumentierten Schülerverhaltensweisen werden durch das Fungieren hypothetisch angenommener Vorverständniselemente in einer bekannten Handlungssituation erklärt. Die formulierten Vorverständniselemente haben notwendigerweise Konstrukt-Charakter. Denkraumen oder Präkonzepte von Schülern sind nicht unmittelbar beobachtbar, sondern werden vom Forscher aus der Auseinandersetzung mit dem ihm vorliegenden Datenmaterial entwickelt und dem Schüler probeweise unterstellt. Zur Absicherung der Hypothesen werden weitere Unter-

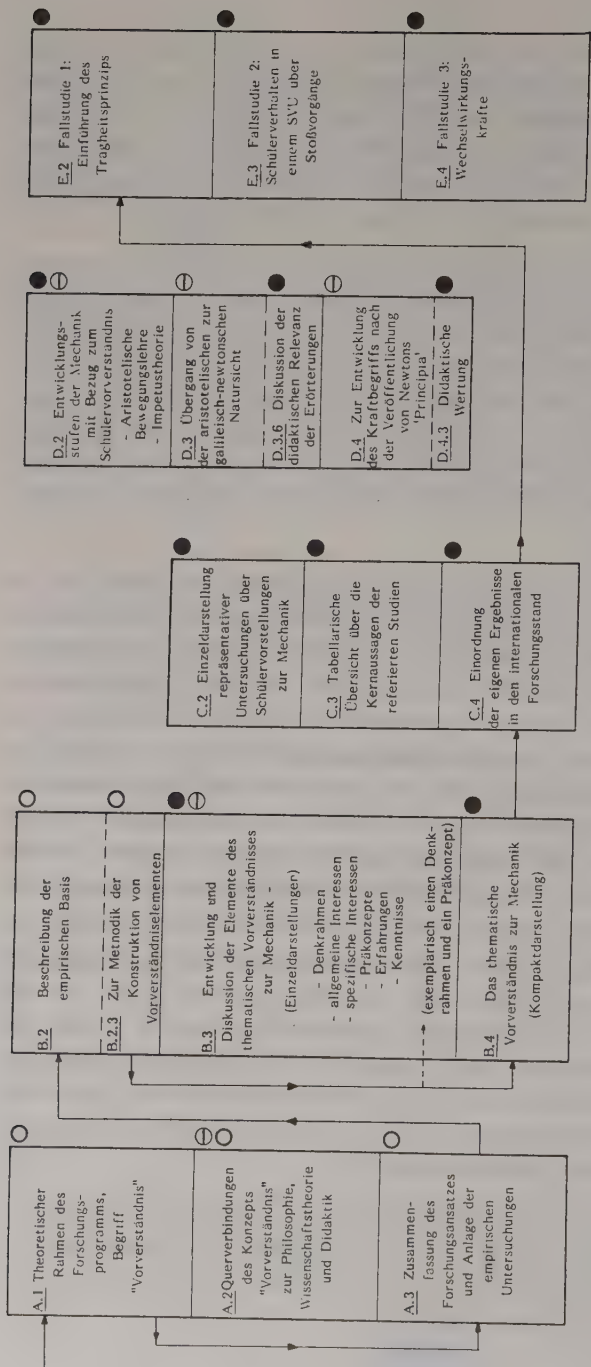
richtsprotokolle herangezogen, und es wird eine Palette schriftlicher Erhebungen mit größeren Populationen durchgeführt. Umgekehrt ergeben sich aus klassischen empirischen Tests Vorverständnis-Hypothesen, deren Eignung für die Evaluation konkreten Unterrichtsverhaltens an Wortprotokollen getestet wird. Hypothesen, die sich im Verlaufe der methodisch vielfältig verzahnten Forschungsarbeiten bewähren, gehen in das thematische Vorverständnis zur Mechanik ein.

Mit der Postulierung verhaltensrelevanter Dispositionen gehen wir über eine reine Deskription hinaus. Durch die Explizierung des theoretischen Rahmens und des Zustandekommens der Interpretationsannahmen (Vorverständniselemente) vor der Anwendung auf neues Datenmaterial wird die Analyse des Schülerverhaltens auf eine systematische, der Kritik zugängliche Grundlage gestellt. Die Erklärungsmächtigkeit des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik wird in dieser Arbeit an Fallstudien gezeigt. Die Interpretationen bauen nicht mehr vorwiegend auf Intuition und hermeneutischem Geschick auf, sondern können sich an einem Diagnoseschema orientieren.

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Hauptkapitel gegliedert. Der Aufbau ist im Blockdiagramm auf Seite 4 veranschaulicht. (Gleichzeitig enthält das Diagramm einen Leitweg, auf dem ein Überblick über Forschungsansatz und Ergebnisse vermittelt wird.) Neben den bisher akzentuierten empirischen Schwerpunkten (Kapitel B und E) gibt es theoretisch-konzeptuelle Abschnitte. In Kapitel A wird der begriffliche Rahmen und das Forschungsprogramm vorgestellt, in denen sich die empirischen Arbeiten vollzogen haben. Es werden didaktisch-methodische Folgerungen aus Erkenntnissen über das Schülervorverständnis diskutiert. Der Begriff "Vorverständnis", der auf eine Arbeit von Niedderer (1975) zurückgeht, wird in Richtung auf ein für empirische Forschungen handhabbares, nach Komponenten und Elementen gegliedertes Konzept ausgebaut: das thematische Vorverständnis.

Die Einsicht in die Bedeutung des Schülervorverständnisses für den Lernprozeß als Erkenntnisprozeß des Schülers liegt beim Verfasser wesentlich in der Beschäftigung mit der Wissenschaftstheorie der Physik begründet - speziell mit der "New Philosophy of Science" (Kuhn, Lakatos: Paradigma-geleitete Forschung). Wir verbinden daher in Kapitel A das Konzept "Vorverständnis" nicht allein mit anderen fachdidaktischen Konzepten, sondern zeigen darüberhinaus Querverbindungen zur Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie auf.

Der theoretische Rahmen, der in Teil A aufgespannt wird, erfährt im zentralen empirischen Kapitel B seine inhaltliche Füllung. Nach einer Darstellung der verwendeten Datenerhebungs- und -auswertungsverfahren wird die Struktur der



Kapitel A
DAS VORVERSTÄNDNIS
Ein Konstrukt für die Analyse von Erkenntnisprozessen

Kapitel B
DAS THEMATISCHE VORVERSTÄNDNIS ZUR MECHANIK
Empirische Basis und Ergebnisse

Kapitel C
INTERNATIONALER FORSCHUNGSSTAND und EINORDNUNG DER EIGENEN ERGEBNISSE

Kapitel D
ZUR GENESE DES KRAFTBEGRIFFS
Historische und wissenschaftstheoretische Ausführungen

Kapitel E
FALLSTUDIEN ZUM SCHÜLERVERHALTEN IM MECHANIK-UNTERRICHT DER SEKUNDARSTUFE II

Vorschlag für einen Leser, der einen kurzen Überblick über Leitideen und Ergebnisse der Arbeit gewinnen will

○ Abschnitte mit dem Schwerpunkt auf empirischen Ergebnissen über das Schülervorverständnis zur Mechanik

○ Abschnitte, in denen das Forschungsprogramm erläutert wird: Begriffe, Methodik, empirische Basis

⊕ Abschnitte mit wissenschaftstheoretischen und/oder ideengeschichtlichen Anteilen

einzelnen Elemente des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik erläutert und ausführlich an Beispielen aus schriftlichen Befragungen und Unterrichtsprotokollen veranschaulicht. Neben im engeren Sinne begriffsbezogenen Präkonzepten (z.B. Vorstellungen zu Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft) finden themenspezifische Elemente Beachtung (Problemlösungsstrategien, allgemeine Interessen). Wissenschaftstheoretische Aspekte spielen bei den Denkrahmen eine wichtige Rolle (Vorstellungen zu Gegenständen, Zielen und Methoden der Physik).

Auf dem Gebiet Schülervorstellungen zur Mechanik besteht eine umfangreiche Literatur, die parallel zu den eigenen Untersuchungen ausgewertet wurde. Es konnte daraus für die Planung der empirischen Erhebungen und die Auswertung des gewonnenen Materials bezüglich begriffsspezifischer Präkonzepte manche Anregung gewonnen werden. In Kapitel C findet sich eine Darstellung repräsentativer Arbeiten der letzten sechs Jahre mit Bezug zur Sekundarstufe II. Eine Übersichtsdarstellung der Kernaussagen aus den referierten Arbeiten beschreibt den internationalen Erkenntnisstand. Anhand der Synopse erfolgt eine vergleichende Einordnung unserer Ergebnisse.

Die Einbeziehung von Aspekten der historischen Genese des Kraftkonzepts wird von fachdidaktischen Überlegungen getragen. In Kapitel D geht es weder um einen zusammenhängenden Abriß der Entwicklungsgeschichte des Kraftbegriffs noch um neue Beiträge zur Wissenschaftsgeschichte. Die Erörterungen orientieren sich vielmehr an Ergebnissen über bestimmte Elemente des Schülervorverständnisses, die in den Kapiteln B und C dargelegt wurden. Sie weisen Parallelen zu historischen Theorievarianten auf. Zu nennen sind bezüglich der Präkonzepte das Aristotelische Kraft-Bewegungs-Konzept und die Impetustheorien sowie die Art der Aufnahme des Newtonschen Kraftbegriffs durch die zeitgenössische Forschungsgemeinschaft nach Veröffentlichung der 'Principia'. Es bestehen Analogien zur Aufnahme des Kraftbegriffs durch Schüler im Physikunterricht. Wir diskutieren unter wissenschaftstheoretischen Gesichtspunkten den Übergang vom aristotelischen zum galileisch-newtonschen Zugang zu Naturphänomenen, weil ein Teil der Schwierigkeiten von Schülern bei der Aneignung mechanischer Konzepte auf mangelnde Einsicht in die Bedeutung und Funktion theoretisch-idealisierten Naturentwürfe im Prozeß der physikalischen Theoriebildung zurückgeführt werden kann. Es fungieren teilweise Denkrahmen, die ein "aristotelisches" Festhalten an den sinnlich einprägsamen Phänomenen der Erfahrungswelt beinhalten. In die historisch-wissenschaftstheoretischen Ausführungen in Kapitel D sind zur Verdeutlichung der didaktischen Relevanz neben Verweisen auf korrespondierende Elemente des thematischen Vorverständnisses an mehreren Stellen direkt Materialien

aus den empirischen Erhebungen eingearbeitet.

Die Erklärungsmächtigkeit des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik als Katalog unterrichtsrelevanter Dispositionen für den Zugriff auf physikalische Begriffe und Phänomene erweist sich bei der Rekonstruktion von Schülerverhalten in konkreten Unterrichtssituationen. Kapitel E enthält zwei ausführliche Fallstudien zu Unterrichtsstunden über den Kraftbegriff. Gegenstand des dritten Beispiels ist ein zweiwöchiger schülervorverständnisorientierter Unterricht (SVU) über Stoßvorgänge. Parallel zur Interpretation der Schülerhandlungen (Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten zu Stoßvorgängen) wird darin die methodische Gestaltung eines SVU erläutert.

Obwohl die Kapitel der vorliegenden Arbeit in einem inneren Zusammenhang stehen, ist es möglich, durch Lesen begrenzter Ausschnitte einen Überblick über die Leitideen und die zentralen Forschungsergebnisse zu gewinnen. Das Blockdiagramm auf Seite 4 zeigt einen entsprechenden Lesevorschlag. Außerdem werden dort die Hauptkapitel nach ihren inhaltlichen Schwerpunkten aufgeschlüsselt, um Lesern mit unterschiedlichen Interessen Orientierungshilfen zu geben.

Kapitel A

DAS VORVERSTÄNDNIS

Ein Konstrukt für die Analyse von Erkenntnisprozessen

A.1

Einführung des Begriffs "Vorverständnis"

A.1.1 Erkenntnisprozesse als Ergebnis einer Wechselwirkung zwischen Vorverständnis und Situation

Beginnen wir mit einer ersten Fassung des Begriffs "individuelles Vorverständnis", der auf eine Arbeit von Niedderer (1975) zurückgeht:

Das individuelle Vorverständnis ist die Gesamtheit der Dispositionen eines erkennenden Subjekts (Schüler, Lehrer, Forscher), die für einen anstehenden Erkenntnisprozeß (z.B. Interpretation eines im Experiment beobachteten Phänomens) bedeutsam sind.

Zu den Dispositionen zählen Präkonzepte zu Begriffen, themenspezifische und themenübergreifende Interessen, Theorie-/Gesetzeskenntnisse, Vorstellungen über Ziele und Methoden der Physik, experimentelle und theoretische Erfahrungen, bevorzugt verwendete Denkkrahmen.

Die Grundannahme unseres Forschungsprogramms lautet:

Ein erkennendes Subjekt wird bei der Wahl von Erkenntniszielen, beim Vollzug von Erkenntnishandlungen und bei der Fixierung von Erkenntnisprodukten von seinem individuellen Vorverständnis angeleitet. Ein Erkenntnisprozeß beruht auf der Wechselwirkung des individuellen Vorverständnisses mit der Problemsituation.

Abbildung A1 (siehe folgende Seite) veranschaulicht diese These. Das Modell beschreibt die Bedingungen und den Verlauf eines Erkenntnisprozesses. Es handelt sich nicht um ein dynamisches Modell. Es ist z.B. wenig geeignet, die Aktivierung anderer Vorverständniselemente beim Scheitern eines ersten Verknüpfungsversuchs oder Veränderungen des Vorverständnisses im Verlaufe einer längeren Auseinandersetzung mit einem Problem zu veranschaulichen. Für ein lerntheoretisches Forschungsprogramm, das auf die Ergründung dieser Prozesse abzielt, müßte ein weit komplexeres Modell entwickelt werden.

Das Individuum verfügt zu einem Phänomen- bzw. Phänomenbereich über einen Satz von Vorverständniselementen. Bei einem Problem aus diesem Bereich, werden bestimmte Elemente aktiviert. Das Individuum wirft ein Netz, gebildet aus den ihm zur Verfügung stehenden Begriffen, Erfahrungen, Kenntnissen usw., über den Sachverhalt aus und strukturiert das Problem. Welche Elemente des Vorverständnisses in den Verknüpfungsprozeß eintreten, wird von der Beschaffenheit der Situation mitbestimmt, in der sich das Problem stellt. Nehmen wir ein konkretes Beispiel: Es gibt zum Zusammenhang von Kraft und Bewegung divergierende Präkonzepte, die im Vorverständnis eines Individuums parallel vorliegen können. Eines lautet "Man braucht Kraft, um einen Körper zu bewegen" (P_1),

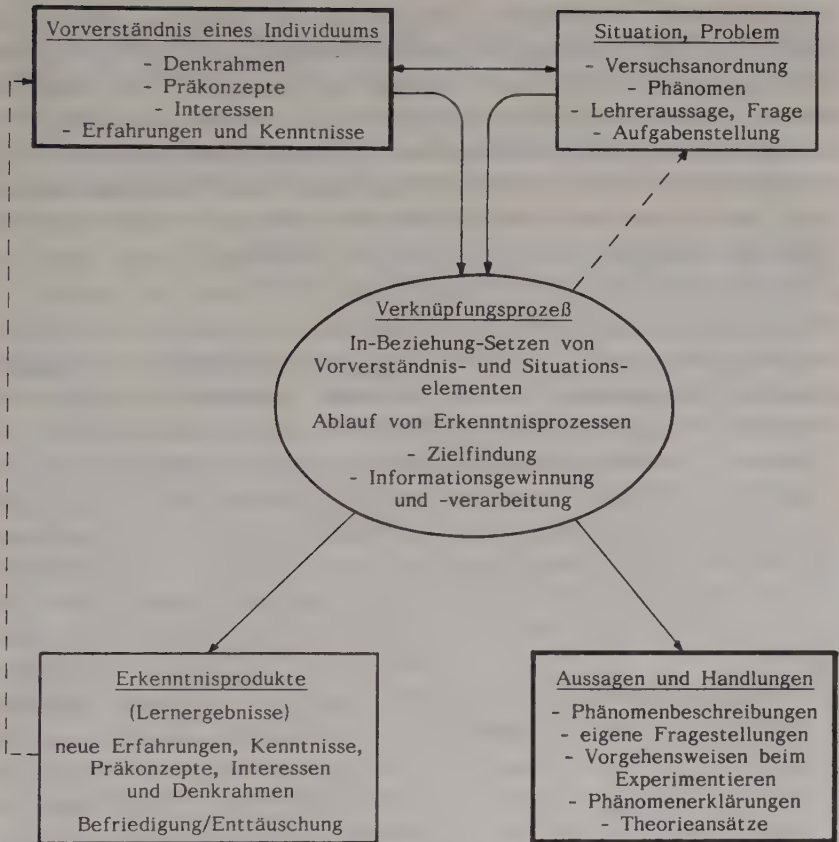


Abb. A1: Wechselwirkung von Vorverständnis und Situation im Erkenntnisprozeß

ein anderes "Man braucht Kraft, um einen Körper in Bewegung zu setzen" (P_2). Ergänzend tritt dazu das als Kenntnis einzustufende Element " $F = m \cdot a$ " (K_1). Welches dieser Elemente mit der Situation verknüpft wird, korreliert mit der Erscheinungsform des Problems. Befindet sich der Körper im Ruhezustand, besteht eine hohe Aktivierungswahrscheinlichkeit für P_2 . Es werden z.B. Zusammenhänge zwischen Maximalgeschwindigkeit und Größe der Kraft hergestellt. Befindet sich der Körper in Bewegung und ist gar eine Bahnkurve angegeben, so wird vorzugsweise P_1 aktiviert, was beispielsweise dazu führt, Kraftpfeile in Richtung der Momentangeschwindigkeit einzuzeichnen. Sind dagegen Zahlenwerte für die Masse des Körpers und die angreifende Kraft gegeben, so erfolgt meist die Aktivierung von K_1 und es werden Zahlenwerte für den Betrag der Beschleunigung berechnet (siehe dazu auch Viennot 1979).

Ebenso wie Parameter der äußeren Situation auf die Aktivierung von Vorverständniselementen einwirken, leitet andererseits das Vorverständnis die Wahrnehmung der Problemsituation an. Das Individuum erschließt sich die Situation; es macht sich sein eigenes Abbild davon. Nehmen wir ein zweites Beispiel: Die vorgegebene "objektive" Situation besteht im zentralen, elastischen Stoß zweier Kugeln unterschiedlicher Masse, bei dem die schwerere Kugel sich in Ruhe befindet. Wenn Schüler diesen Vorgang wiedergeben, muß man häufig feststellen, daß die Bewegung der kleinen Kugel nach dem Stoß nicht in die Beschreibung aufgenommen wird. Ihr Augenmerk gilt der Bewegung der großen Kugel. Das geht manchmal so weit, daß selbst auf Nachfrage über die kleine Kugel keine Aussage gemacht werden kann. Wir führen das auf das Fungieren spezifischer Vorverständniselemente zurück: Aus den Kategorien der allgemeinen Interessen und Denkrahen sind die Tendenz zum Aufsuchen vermeintlicher Verursacher von Vorgängen, die Zuschreibung von Zwecken zu Vorgängen und die Bevorzugung linearen Denkens statt Wechselwirkungsdenkens zu nennen. Weiterhin spielt das Präkonzept eine Rolle, daß ein sich bewegnender Körper Kraft hat, die er auf andere Körper übertragen kann. Daraus resultiert eine vorgängige Interpretation des Phänomens: Die kleine Kugel "soll" die große in Bewegung setzen; sie muß dazu möglichst viel Kraft übertragen. Dadurch wird die Wahrnehmung gesteuert: Die Blickrichtung gebührt nach dem Stoß der großen Kugel, denn ihr galt die "Aktivität" der kleinen.

Das Individuum kann im Verknüpfungsprozeß neue Elemente schaffen, die als Quasirealität die Situation erweitern. Zu solchen vorverständnisinduzierten Situationselementen zählen insbesondere gegenständlich vorgestellte Modelle, wie elektrische Fluida, Impulsströme oder Elektronenkügelchen. Es mag auch Ad-hoc-Schöpfungen von Präkonzepten als situationsinduzierte Vorverständnisele-

mente geben. Wir bevorzugen jedoch, in der Situation geborene Annahmen nicht dem Vorverständnis zuzuordnen, sondern sie als Erkenntnisprodukte des Verknüpfungsbereichs aufzufassen. Wir wollen in das Vorverständnis nur relativ stabile Elemente aufnehmen.

Als Ausfluß von Erkenntnisprozessen, die im Verknüpfungsprozeß ablaufen, können sich ergeben:

- a) Aussagen und Handlungen. Damit sind diejenigen Manifestationen eines Erkenntnisprozesses gemeint, die einem Beobachter empirisch zugänglich sind und aus denen wir auf fungierende Vorverständniselemente rückschließen können.
- b) Neue Erkenntnisprodukte. Als Ergebnis des Inbeziehungsetzens von Vorverständnis und Lehrangebot kann das Individuum zu neuen Erkenntnissen gelangen. Auf der untersten Stufe wäre das z.B. die Kenntnis einer Formel als Rechenvorschrift. Auf einer höheren Stufe angesiedelt wären neue Präkonzepte oder Umbildungen alter (z.B. "Actio und reactio sind Kräfte, die an verschiedenen Körpern angreifen"). Gehen die Erkenntnisprodukte dauerhaft in das Vorverständnis ein, so sprechen wir von Lernergebnissen.

Wir trennen zwischen Aussagen/Handlungen und Erkenntnisprodukten, weil erstens nicht jede neue Erkenntnis von einer Aussage begleitet wird und zweitens nicht jede Aussage im Zusammenhang mit neugewonnenen Erkenntnissen steht. Gelingt dem Individuum die subjektiv befriedigende Anpassung einer Information an die vorhandene Vorverständnisstruktur, so kommt es allenfalls zu einer Aussage. Für unser Forschungsprogramm sind der linke obere und der rechte untere Kasten in Abbildung A1 vorrangig. Beobachtbare Aussagen und Handlungen bilden die empirische Basis aus der wir Hypothesen über Vorverständniselemente gewinnen. Zur Basis tragen die Schüler bei, die sich aktiv am Unterrichtsgeschehen oder an Befragungen beteiligen. Über die inneren Handlungen der anderen Schüler können wir keine Aussagen treffen. Die Annahme der Vorverständnisgeleitetheit jedes Erkenntnisprozesses und seiner Manifestationen initiiert ein Programm: Suche nach den fungierenden Vorverständniselementen. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, daß manche Aussagen und Handlungen durch Zufälle oder mangelnde sprachliche Ausdrucksfähigkeit zustandekommen. So wie jede Methodologie hat auch die Theorie des vorverständnisgeleiteten Erkennens ihre "externe Geschichte" (vgl. Lakatos 1974b).

A.1.2 Die Bedeutung des Vorverständnisses für Vermittlung und Erwerb physikalischer Kompetenz

Bei den folgenden Ausführungen beziehen wir uns auf das Modell des Erkenntnisprozesses, wie es in Abbildung A1 (Seite 9) wiedergegeben ist. Im Physikunterricht wird die äußere Situation durch den Lehrer bestimmt. Er wählt die zu behandelnden Themen aus, bringt die Experimente ein, stellt Fragen, formuliert Aufgaben. Die Art der Informationsverarbeitung kann von ihm jedoch nicht determiniert werden. Ein wirklicher Erkenntnisprozeß des Schülers kann nur dann ablaufen, wenn das Lehrangebot aktiv mit dem Vorverständnis in Beziehung tritt. Die Verknüpfung kann nur vom Lerner selbst vorgenommen werden. Letztlich bestimmt der Schüler seine Ziele, der Schüler entscheidet, welche Beobachtungen relevant für ein von ihm gesehenes Problem sind, und der Schüler fixiert die Erkenntnisprodukte. Der Lehrer wird versuchen, durch eine geeignete Gestaltung der Lernumwelt darauf Einfluß zu nehmen. Es kann ihm gelingen, Schüler zu den von ihm (dem Lehrer) gewünschten Beobachtungen und Aussagen zu führen. Produktiv für die Ausbildung neuer Wissensstrukturen werden diese jedoch nur dann, wenn der Schüler sie als eigene Beobachtungen und Aussagen anerkennt und übernimmt. Der Lehrer kann den Schüler nicht auf bestimmte Schlußfolgerungen "programmieren".

Die Vorverständnisse von Lehrer und Schülern unterscheiden sich voneinander aufgrund unterschiedlicher persönlicher und fachspezifischer Sozialisationen. Gleiches gilt in eingeschränktem Maß auch für die individuellen Vorverständnisse der Schüler untereinander (und der Lehrer untereinander). Schüler werden sich bei eigenständiger Auseinandersetzung mit einem Phänomen immer wieder auf andere Aspekte konzentrieren, andere Interpretationsansätze verfolgen und zu anderen Ergebnissen kommen als der Lehrer. Dieser Sachverhalt ist nicht durch Versuche zu umgehen, "am Vorverständnis vorbei" Wissensstrukturen beim Schüler zu implementieren. Die Annahme, Schüler hätten vor dem Physikunterricht keine oder nur unbedeutende und durch formale Instruktion leicht überwindbare Vorstellungen über naturwissenschaftliche Sachverhalte (Bewegung, Kräfte, Wärme, Licht, Elektrizität), ist durch fachdidaktische Forschungen eindeutig widerlegt (vgl. Osborne 1983, 489ff). Der Erkenntnisstand zeigt, daß das Schülervorverständnis für Lernprozesse eher wichtiger ist als die Aufbereitung und Präsentationsform des Lehrangebots ("student dominance assumption"; vgl. Gilbert 1982).

Man muß das Schülervorverständnis nicht erst aktivieren. Es fungiert vorgängig bei jedem Erkenntnisprozeß. Allerdings kann es zu einer zeitweisen Überdeckung der Wechselwirkung zwischen Lehrangebot und Vorverständnis der Art kommen,

daß Schüler angebotene Floskeln ("Arbeit ist Kraft mal Weg") oder Rechenalgorithmen (" $v = a \cdot t$ ") direkt übernehmen (oft sehr verkürzt, wie die Beispiele andeuten sollten), ohne sie mit ihren Vorverständnisstrukturen in Beziehung zu setzen. Das ist etwa dann der Fall, wenn Schüler kinematische (Rechen-) Aufgaben lösen können, ohne die Begriffe Geschwindigkeit und Beschleunigung physikalisch akzeptabel mit Inhalt gefüllt zu haben. Solche Oberflächeneffekte verschleiern oft konzeptuelle Defizite.

Wir wollen unter einem Lernprozeß einen Erkenntnisprozeß verstehen, der zu einer dauerhaften Erweiterung oder Umstrukturierung von Teilen eines individuellen Vorverständnisses führt. Über die Richtung der Veränderungen ist damit nichts ausgesagt. Dauerhaft sind solche Umbildungen des Vorverständnisses, die sich für das Individuum als Erweiterung seiner Problemlösungskompetenz bewähren. Dieses Kriterium ersetzt äußere Festlegungen, die Lernen auf Veränderungen in Richtung auf physikalisch richtige Elemente eingrenzen. Zu einem Lernprozeß in diesem Sinne kommt es, wenn Gründe für ein Überdenken vorhandener Vorstellungen gesehen werden. Anstöße hierfür können nicht unmittelbar durch die äußere Situation vorgegeben werden. Was das Individuum als hinreichende Gründe für das Infragestellen bestimmter Elemente empfindet, entscheidet es wiederum selbst. An einem Beispiel verdeutlicht: Der Lehrer kann noch so (für ihn) einleuchtende Belege für den relationalen Charakter des Newtonschen Kraftbegriffs einbringen, der Schüler braucht deshalb seinen, nennen wir ihn, Alltagskraftbegriff (Körpereigenschaft, Fähigkeit Wirkungen zu erzielen) nicht zu überdenken; er braucht keine Beziehungen zu seinen Präkonzepten herzustellen. Der Schüler kann die Ausführungen des Lehrers statt dessen im Lichte seines Vorverständnisses uminterpretieren und mit seinem Präkonzepten versöhnen. Bei solchen Prozessen fungiert oft ein Denkrahm, den man folgendermaßen umreißen kann: "Eigentlich ist Physik ganz einfach. (Ich weiß ja was Kraft ist.) Die Begriffe werden nur unnötig verkompliziert" (vgl. Wagenschein 1980).

Wir plädieren zur Förderung von Lernprozessen für die Offenlegung relevanter Vorverständniselemente. Die Chance, daß ein Schüler aus einem Lernumfeld Anstöße für Veränderungen von Denkrahm und Präkonzepten aufnimmt, erhöht sich, wenn er sich seiner vorhandenen Elemente bewußt wird. Dies gilt um so mehr in physikalischen Gebieten, in denen man vom Vorliegen themenspezifischer Präkonzepte ausgehen muß - also in der Mechanik stärker als in der Relativitätstheorie. Die Gegenthese, man müsse vermeiden, "falsche" Schülervorstellungen zu aktivieren, da diese den zu vermittelnden Sachstrukturen im Wege stehen würden, ist in der neueren fachdidaktischen Diskussion auf dem Rückzug. Die große Resistenz von Schülervorstellungen gegenüber Veränderungen durch sach-

strukturorientierte Unterweisung ist eine durchgehende Feststellung (siehe Kapitel C, Seite 388ff.). Aus der Einsicht in diesen Sachverhalt und aus der Kenntnis von Schülervorstellungen können zwei Arten von Konsequenzen gezogen werden:

- I Umgestaltung der Sachstruktur: Abstimmung der Sachstruktur auf Schülervorstellungen, Umgehung von als besonders vermittlungsproblematisch erkannten Teilen, vertieftes Eingehen auf Elemente, bei denen große Differenzen zu Schülerpräkonzepten bestehen, Anknüpfung an im Sinne der Physik ausbaufähige Präkonzepte. (Zur Dynamik in der Sekundarstufe II liegt ein Kursvorschlag von Jung (1981a) vor, der sich auf detaillierte Studien von Schülervorstellungen stützt.)
- II Veränderung der Methodik des Physikunterrichts: Explizierung von Vorverständniselementen im Unterricht. Den Schülern wird Gelegenheit gegeben, ihre eigenen Beobachtungen und Interpretationsansätze zu artikulieren. Schüler erhalten phasenweise die Möglichkeit, weitgehend unbeeinflusst eigene Fragestellungen zu entwickeln und zu verfolgen. Unterschiede zu physikalischen Denkrahmen und Präkonzepten werden im Unterricht explizit behandelt. (Der Ansatz eines in dieser Weise am Schülervorverständnis orientierten Unterrichts (SVU) ist mit Beispielen bei Niedderer (1982a) und Schecker (1984a) veröffentlicht. Von Pukies (1979) liegen Konzepte für einen historisch-genetischen Unterricht in Mechanik und Thermodynamik vor.)

Die geschilderten Konsequenzen korrespondieren mit den beiden Punkten, an denen der Lehrer auf den Ablauf von Erkenntnisprozessen einwirken kann:

- Bei der inhaltlichen Gestaltung des Lernumfelds: Auswahl und Aufbereitung der anzubietenden Informationen, Bereitstellung von experimentellen und theoretischen Handlungsfeldern.
- Bei der organisatorischen Gestaltung des Lernumfelds: Im Wechsel kompaktes Vortragen der Sachstruktur durch den Lehrer, Vorgabe von "zu verfolgenden" Fragestellungen, "relevanten" Beobachtungen und "zwingenden" Ergebnissen und Ermunterung der Schüler zur Äußerung eigener Beobachtungen und Erklärungsansätze.

Konsequenzen des Typs I sind der Versuch, das Schülervorverständnis in die Planung der Unterrichtsinhalte einzubeziehen. Die zu vermittelnde Sachstruktur wird nicht allein aus dem Theorienbestand der Physik abgeleitet, sondern auch dem Aspekt der Vermittelbarkeit unterworfen. Die Suche gilt einer Sachstruktur, die mit der physikalischen Theorie vereinbar ist und die möglichst wenig Anlässe für Interferenzen mit dem Schülervorverständnis bietet. Neben den unverkennbaren Vorteilen darf man die Gefahr einer Instrumentalisierung des Vorverständnisses

ses nicht übersehen: Der Lehrer kennt die Probleme der Schüler besser als diese selbst. Die Kenntnis des Schülervorverständnisses kann zum "Herrschaftswissen" werden, wenn es dazu genutzt wird, den Dialog mit dem Schüler zu umgehen und ihn an der Einbringung eigener Ideen zu hindern, soweit diese von der Sachstruktur abweichen könnten:

Die Kenntnis der Dispositionen sollte dem Lehrer helfen, den Unterricht so anzulegen, daß ihre Aktualisierung möglichst vermieden wird oder doch herausgezögert wird, bis die "richtige" Vorstellung schon verfügbar ist. (...) Der Lehrer ... muß seine "Botschaft" auf irgendeine Weise an dem Filter vorbeisenden.
(Jung 1981a, 9)

Nun kann man einwenden, der Zweck der Effektivitätssteigerung des Unterrichts rechtfertige den Einsatz subtiler Planungs- und Steuerungsmechanismen. Maßnahmen nach Konsequenz I sind sicherlich eine Form von Schülerorientierung. Sie können zu einem für beide Seiten, Schüler und Lehrer, befriedigenderen Unterrichtsverlauf führen als die Behandlung einer allein aus der Fachsystematik abgeleiteten, elementarisierten und in eine elegante Form gebrachten Sachstruktur - mit dem Ergebnis, daß die einen elementare Verständnisschwierigkeiten haben und der andere feststellt, daß seine Vermittlungsbemühungen ohne den erhofften Erfolg bleiben. Wie sehen aber neben der oben angedeuteten Gefahr vier weitere Einwände gegen ausschließliche Konsequenzen der ersten Art.

1. Es wird kaum gelingen, problematische Vorverständniselemente solange zu umgehen, bis die "richtige" Theorie vermittelt werden konnte. Man kann vielleicht bis zu einem gewissen Grad die Aktivierung spezifischer Präkonzepte vermeiden, für die themenübergreifenden Elemente (Denkrahmen, allgemeine Interessen) gilt das sicher nicht. Mir erscheint die Initiierung eines Lernprozesses unwahrscheinlich, der im Aufbau einer physikalischen Säule neben den Alltagsvorstellungen besteht, die erst nach ihrer Fertigstellung in Wechselwirkung mit den vorher vorhandenen Elementen tritt. Die physikalische Säule muß bereits während ihres Aufbaus in Beziehung gesetzt werden. Die Verknüpfung kann darin bestehen, daß physikalische und lebensweltliche Präkonzepte mit dem gleichen Begriffswort ("Kraft", "Strom") bewußt voneinander abgegrenzt werden.

2. Auch wenn die Forschungen über Präkonzepte, z.B. in den Bereichen Mechanik und Elektrizitätslehre, konvergente Ergebnisse zeitigen, ist für den Lernprozess das jeweilige individuelle Vorverständnis eines Schülers ausschlaggebend. Umgestaltungen der Sachstruktur können aber nur pauschal, ohne Berücksichtigung der jeweiligen Kurspopulation erfolgen. Die Individualität des Lernprozesses schränkt die Wirksamkeit globaler Konsequenzen der ersten Art ein.

3. Nur wenn Schüler auf der Grundlage ihres Vorverständnisses arbeiten, besteht die Möglichkeit, daß sie sich ihrer Denkrahmen und Präkonzepte auch bewußt werden, so daß Unterschiede zur physikalischen Sachstruktur wirklich wahrgenommen werden können. Konkrete Beispiele für die Veränderung von Präkonzepten dadurch, daß die eigenen Vorstellungen beim Vollzug von Erkenntnisprozessen den Schülern selbst bewußt wurden, werden in Fallstudie 2 aus einem SVU geschildert (siehe Punkt E.3).

4. Konsequenzen des Typs I zielen auf eine subtile Lenkung der Schüler ab - und sei es dadurch, daß sie um bestimmte Stolpersteine herumgeführt werden sollen. Das dient nicht der Förderung eigenständigen Denkens in der Physik. Wenn wir vom unhintergehbaren Fungieren des Vorverständnisses ausgehen, werden die Schüler immer wieder zu Beobachtungen und Aussagen kommen, die der Lehrer so nicht akzeptiert. Niederer (1982b, 118f) hat die daraus entstehende Situation folgendermaßen analysiert: Der Lehrer wird dem Schüler direkt oder unterschwellig zu verstehen geben, daß seine Denkansätze falsch bzw. unvollkommen sind. Dem Schüler bleiben drei Alternativen:

- Er resigniert und glaubt, die Physik sei für ihn zu schwierig.
- Er paßt sich in Sprache und Denkgewohnheiten dem Lehrer bzw. der Physik an und erahnt allmählich die "richtigen" Antworten.
- Er rebelliert gegen Fach und Lehrer (ablehnende Haltung gegenüber Naturwissenschaft und Technik, Störung des Unterrichts).

Solche Prozesse laufen im Physikunterricht ständig ab. Um der Resignation oder der persönlichen Verweigerung entgegenzuwirken (beide bedeuten eine Abwendung von der Physik, die nicht auf einer reflektierten Entscheidung beruht), sollte man die Konflikte zwischen Lehrer- und Schülervorverständnis im Unterricht einer offenen Aussprache zuführen. Dabei sind neben den begriffsspezifischen Präkonzepten die übergreifenden Vorstellungen über die Art der Herangehensweise an Phänomene aus Natur und Technik sowie Sinnfragen der physikalischen Erkenntnismethode aufzugreifen. Von der Fachsystematik abweichende Beobachtungsschwerpunkte oder Erklärungen sind vom Lehrer ernst zu nehmen. Der notwendige Vergleich mit dem physikalischen Erkenntnisstand ist nicht nach dem Kriterium "richtig/falsch" sondern nach den Kriterien "in sich zielgerichtet" und "in sich sinnvoll und konsistent" durchzuführen.

Es gibt neben dem physikalischen auch andere sinnvolle Erkenntniswege (technische, alltagspraktische, künstlerische). Das Ziel des Physikunterrichts kann nicht darin bestehen, den physikalischen als den besten oder gar einzig möglichen herauszustellen. Die Physik hat in bestimmten Fragehorizonten Vorteile, weil

sie ein geschlossenes, auf allgemeingültigen Prinzipien beruhendes Weltbild bereitstellt. Die Bewertung der persönlichen Relevanz physikalischer Denkrahmen bleibt jedoch jedem Schüler selbst überlassen. Jung (1981a, 10) hat darauf hingewiesen, daß das Geltenlassen anderer als der physikalischen Vorstellungen zu einem Sachverhalt die Akzeptanz der physikalischen Denkmuster erleichtern kann, da bei den Schülern der Zwang entfällt, ihre im Alltagsdiskurs bewährten Denk- und Sprechweisen aufgeben zu müssen. Die physikalischen Vorstellungen können als alternative Sichtweisen dazugelernt werden.

Viel ist erreicht, wenn durch die Explizierung unterschiedlicher Präkonzepte, Denkrahmen und Interessen im Physikunterricht den Schülern klar wird, daß die Fragehorizonte und die Typen der angestrebten Antworten sich von technischen oder alltagspraktischen unterscheiden (siehe dazu Punkt B.3.2.1). Erreichen läßt sich dadurch viel für das Lernen über Physik (wissenschaftstheoretischer Aspekt) ebenso wie für das Lernen von Physik (Sachstrukturaspekt). Bei Bewußtwerdung der Unterschiede wird dem Glauben abgeholfen, physikalische Begriffe seien lediglich Präzisierungen und Quantifizierungen von Alltagsbegriffen - eine Fehlvorstellung, die z.B. beim Kraftbegriff Verständnisschwierigkeiten induziert. Lernblockaden durch Zweifel am Sinn bestimmter methodischer Elemente der Physik (Gedankenexperimente, Idealisierungen) entwickeln sich ebenfalls an physikalisch unproduktiven Denkrahmen.

Die Überlegungen zur Bedeutung des Vorverständnisses für Vermittlung und Erwerb physikalischer Kompetenz münden in didaktische Konsequenzen der Typen I und II, die sich gegenseitig ergänzen. Während Umgestaltungen der Sachstruktur primär auf Erkenntnissen über begriffs- und phänomenspezifische Präkonzepte aufbauen, können bei der Explizierung von Vorverständniselementen im Unterricht auch Denkrahmen und Interessen einer bewußten Verarbeitung zugeführt werden. (Wir denken dabei an Schüler der Sekundarstufe II.) Die Ermutigung der Schüler zur Äußerung ihrer eigenen Beobachtungen und Erklärungsansätze trägt der Individualität des Lernprozesses Rechnung. Der Lehrer kann auf die jeweilig vorhandenen Vorstellungen eingehen, die bei globalen Maßnahmen des Typs I nicht berücksichtigt werden können. Das In-Beziehung-Setzen, das der Schüler vornehmen muß, wird dadurch direkt unterstützt.

A.1.3

Das Konstrukt "Thematisches Vorverständnis"

Die Grundthese unseres Forschungsprogramms besagt, daß jedes Subjekt beim Vollzug von Erkenntnisprozessen von seinem Vorverständnis angeleitet wird (siehe Punkt A.1.1). Wir werden die These im Verlaufe des Kapitels A durch Einbettung des Vorverständnisbegriffs in philosophische und wissenschaftstheoretische Traditionen sowie neuere fachdidaktische Entwicklungen erhärten (Punkt A.2). Die reale Existenz einer Vorstruktur des Erkennens, von uns individuelles Vorverständnis genannt, kann als gesichert gelten. Das individuelle Vorverständnis entwickelt sich auf verschiedene Weise, in manchen Bereichen eher durch den alltäglichen Umgang mit Dingen (z.B. gilt das für den Phänomenbereich der klassischen Mechanik) und die Übernahme von in der Umgangssprache verborgenen Präkonzepten (siehe dazu Seite 37ff), in anderen stärker durch formale Unterweisung und die Verarbeitung von Lehrinformation (z.B. in der Atom- und Kernphysik).

"Vorverständnis" ist ein epistemologischer Begriff. Der Präfix "Vor" bezeichnet keinen zeitlichen Zustand "vor dem Verständnis", sondern die notwendige Präfiguration des Erkenntnisapparats, die es dem Individuum erst ermöglicht, sich mit einem neuen Sachverhalt auseinanderzusetzen. Dem "Vor-Verständnis" folgt kein "(Nach-) Verständnis", sondern gegebenenfalls ein verändertes Vorverständnis, das beim Anstehen eines weiteren Erkenntnisprozesses erneut als Vorverständnis fungiert. Wenn wir zu einem Phänomen über keinerlei Vorverfahren, Denkrahmen oder Vorstellungen verfügen, fehlt uns jegliche Basis für produktive Erschließungsversuche.

Es erhebt sich die Frage, auf welchem Wege wir zu Aussagen über das Vorverständnis von Schüler gelangen können. Da es uns um das Verstehen von Schülerverhalten in einem bestimmten Rahmen geht (Physikunterricht der Sekundarstufe II über klassische Mechanik), sind nicht individuelle Vorverständnisse in ihrer Gesamtheit zu berücksichtigen, sondern in den für das Handlungsfeld relevanten Teilbereichen. Man kann Vorverständniselemente weder unmittelbar beobachten noch direkt erfragen. Wenn wir einen Schüler nach seinen Überlegungen zu einem bestimmten Problem fragen, sind seine Antworten bereits Ergebnis der Wechselwirkung seines Vorverständnisses mit der Situation, zu der neben dem Phänomen oder der gestellten Aufgabe auch die Formulierung unserer Fragen zählt. Wir müssen zwischen den mündlichen/schriftlichen Aussagen eines Schülers im Unterricht, in Klausuren, Verständnistests, Interviews usw. auf der einen Seite und dem Vorverständnis als der diese Äußerungen generierenden Struktur auf der anderen Seite unterscheiden. Das Vorverständnis ist nicht einfach die Summe der Aussagen in einem Themenbereich. Elemente des Vorverständnisses sind

Strukturen allgemeinerer Art, durch die spezielle Aussagen zustande kommen.

Für Aufschlüsse über einzelne individuelle Vorverständnisse wären Daten notwendig, die Handlungen und Aussagen bestimmter, einzelner Schüler in vielen ähnlichen, aber variierenden Situationen des gleichen Handlungsfeldes über einen längeren Zeitraum dokumentieren. Die in dieser Arbeit verwendete Datenbasis erstreckt sich dagegen querschnittartig über viele, verschiedene Schüler. Wir streben keine spezifischen Aussagen über individuelle Vorverständnisse bestimmter Schüler an, sondern übergreifend gültige Aussagen über die Typik der Herangehensweise von Oberstufenschülern an Phänomene und Begriffe der Newtonschen Mechanik. Aus der Wechselwirkung unseres eigenen Vorverständnisses, dessen Charakteristika unter Punkt A.3.2 beschrieben werden, mit dem Datenmaterial (z.B. in Unterrichtsprotokollen dokumentiertes Schülerverhalten oder Antwortverteilungen in schriftlichen Tests) gelangen wir zu Hypothesen über Denkraumen, Präkonzepte, Interessen, Erfahrungen, die geeignet erscheinen, das beobachtete Verhalten zu interpretieren. Wir konstruieren Vorverständniselemente und überprüfen die Angemessenheit der Konstrukte daran, ob es uns gelingt, bei Kenntnis der Handlungssituation die beobachteten Handlungen schlüssig zu erklären, wenn wir dem jeweiligen Schüler unterstellen, er handele unter Anleitung des postulierten Vorverständniselements. Wir können die Hypothesen am Verhalten vieler Schüler in der gleichen Testsituation oder in sehr ähnlichen Unterrichtssituationen testen, denn aufgrund unserer breiten Datenbasis steht uns umfangreiches und methodisch vielfältig gewonnenes Material von Schülern der gleichen Altersstufe zur Verfügung, die unter ähnlichen unterrichtlichen Rahmenbedingungen mit Phänomenen und Begriffen der klassischen Mechanik konfrontiert wurden. Bewährt sich das konstruierte Vorverständniselement, d.h. kann man unter Voraussetzung seines Fungierens das Verhalten vieler Schüler in einer möglichst breiten Palette von Situationen plausibel erklären, so zählen wir es zum thematischen Vorverständnis. Das Attribut "thematisch" verweist zum einen auf eine wesensmäßige Abgrenzung vom "individuellen" Vorverständnis und zum anderen auf die Zugehörigkeit der subsumierten Elemente zu einem begrenzten Phänomen- bzw. Handlungsbereich (im vorliegenden Fall die klassische Mechanik: Bewegung von materiellen Dingen in Raum und Zeit). Das thematische Vorverständnis ist ein Konstrukt, weil es aus konstruierten Elementen aufgebaut ist. Man kann die themenbezogenen Anteile tatsächlicher individueller Vorverständnisse nicht einfach wie ein Puzzle aus ausgewählten Elemente des thematischen Vorverständnisses zusammensetzen, weil die Erfahrungen, Präkonzepte, Denkraumen und Interessen eines Individuums jeweils persönliche Ausprägungen haben, die sich z.B. in affektiven Besetzungen ausdrücken. Die Elemente des themati-

schen Vorverständnisses sind in ihren Formulierungen abstrakter als die Form, in der individuelle Vorverständniselemente vorliegen werden.

Die Aufstellung eines thematischen Vorverständnisses beinhaltet eine Reduktion der Vielfalt individueller Vorverständniselemente auf einen an der Gesamtpopulation orientierten Kern und eine Auswahl aus der Gesamtmenge der potentiell darstellbaren Element-Konstrukte. Beides ist notwendig, um zu einer weitergabefähigen Menge von Denkraumen, Präkonzepten usw. zu gelangen, die übersichtlich und begrenzt genug ist, um eine Orientierungshilfe für Unterrichtende darzustellen. Zulässig sind Reduktion und Auswahl dann, wenn die im Forschungsprozeß gebildeten Hypothesen nicht zu sehr streuen. Für die Mechanik ist das gewährleistet. Die Ergebnisse von Untersuchungen über Präkonzepte zu mechanischen Begriffen und Phänomenen sind sehr konvergent (siehe dazu Kapitel C). Es steht zudem zu erwarten, daß die individuellen Vorverständnisse der Schüler einen gemeinsamen Überlappungsbereich haben, den wir mit dem thematischen Vorverständnis zu erschließen versuchen, denn die Umwelten, in denen sich individuelle Vorverständnisse herausbilden, sind für den Bereich der Mechanik, sowohl was die alltägliche Erfahrung mit Bewegungen als auch was den Physikunterricht betrifft, sehr ähnlich. Außerdem findet in jeder Kommunikationssituation ein interpersonaler Abgleich der verwendeten Beschreibungs- und Deutungsmuster statt, ohne den keine Sprachgemeinschaft fortbestehen könnte.

A.1.4 Zur Strukturierung des thematischen Vorverständnisses

Wir verwenden zur Charakterisierung von Elementen des thematischen Vorverständnisses die Bezeichnungen Denkrahen, Interesse, Präkonzept, Kenntnis und Erfahrung. Die Einteilung wurde zum Zwecke einer sinnvollen Gliederung der als Ergebnis der empirischen Arbeiten vorliegenden Konstrukte über generative Strukturen für Aussagen und Handlungen von Schülern im Bereich der klassischen Mechanik gewählt. Die Kategorisierung gilt primär für ein thematisches Vorverständnis, ist aber auch auf individuelle Vorverständnisse anwendbar. Sie beruht nicht auf einer bestimmten kognitionspsychologischen Theorie. Bei aller formalen Eleganz und der an Einzelbeispielen bewiesenen Schärfe der Modelle (z.B. der semantischen Netzwerke; siehe Rost 1980) sehen wir keines, das gleichzeitig den Anforderungen der Umfassendheit und der Übersichtlichkeit genügend gerecht werden kann, wenn es gilt, ein so komplexes Gebilde wie das thematische Vorverständnis zur Mechanik darzustellen. Noch dienen der Kognitionspsychologie physikalische Beispiele eher zur Elaboration der Theorie als zur Vermittlung konkreter Aussagen über Schülervorstellungen. (Es gibt Ausnahmen wie Maichle 1985.) Wir halten es für notwendig, daß die Fachdidaktik eigene Modelle entwickelt oder adaptiert, die ihrem Forschungsgegenstand und ihren spezifischen Forschungszielen angepaßt sind.

Die Grundidee für unser Modell lautet, daß ein thematisches Vorverständnis aus relativ spezifischen Elementen (an einzelne Begriffe oder Phänomene gebunden) und aus Elementen allgemeinerer Art aufzubauen ist, die den generellen Zugang von Schülern zu physikalischen Sachverhalten kennzeichnen. Stichworte zu letzterem sind "Vorstellungen von Gegenständen, Zielen und Methoden der Physik" oder "Denkstrategien/Problemlösungsverhalten". Diese Grobteilung wurde im Projekt "Wissenschaftstheoretisch orientierter Physikunterricht" in verschiedener Weise in konkrete Darstellungsmodelle umgesetzt. Eines ist in Schecker 1983a veröffentlicht (siehe folgende Seite). Es sah vier Ebenen des Vorverständnisses vor, die jeweils wieder in die Bereiche Vorstellungen/Einstellungen und Interessen/Fragerichtungen unterteilt waren.

Die Ebenen 1 und 2 sind in dem Modell, das wir heute verwenden, in der Vorverständniskomponente I "Denkrahen und allgemeine Interessen" zusammengefaßt, da bei den allgemeinen Elementen nur solche relevant sind, die sich im Physikunterricht manifestieren. Die Ebene 3 wurde fallengelassen, weil die empirisch begleiteten Kurse sich ganz überwiegend an der durch die Wissenschaft Physik vorgegebenen Systematik orientierten und nicht an Alltags-Sachbereichen wie "Verkehrssicherheit" oder "Sport". Die themenspezifischen Elemente werden

Ebene	Bereich Einstellungen/ Einstellungen	Bereich Interessen/ Fragerichtungen
1. allgemeines Vorverständnis	- Geben-Nehmen-Schema - Verbrauchs-Schema	- Schuldige, Verursacher finden - lieber alleine/in Gruppen arbeiten
2. physikspezifisches VV	- Physik hat etwas mit trickreichen Anordnungen zu tun - man braucht aufwendige Apparaturen	- Experimentieren - Formeln aufstellen
3. sachspezifisches VV	Sachbereich Verkehrssicherheit: Verletzungen kommen durch <u>Aufprall</u> zustande	- Verletzungen vermeiden
4. themenspezifisches VV	- Mechanik: große Geschwindigkeit entspricht großer "Kraft" - Magnetismus: Man muß zwischen "natürlichem" Magnetismus und Elektromagnetismus unterscheiden	- Kräfte messen - Wie funktioniert die magnetische Tonaufzeichnung? - Was hat das Nordlicht mit Magnetismus zu tun?

(aus Schecker 1983a, 151)

jetzt als "Präkonzepte" geführt.

Im thematischen Vorverständnis zur Mechanik ist die Grundteilung zwischen übergeordneten Vorverständniselementen und themenspezifischen Anteilen erhalten geblieben. Zwar werden auch die übergeordneten Elemente vorwiegend an Datenmaterial aus der Mechanik entwickelt und diskutiert, ihre Gültigkeit über die Mechanik hinaus kann jedoch hypothetisch angenommen werden und soll Gegenstand weiterer Arbeiten unserer Forschungsgruppe sein.

Wir verwenden zur Beschreibung des thematischen Vorverständnisses in der vorliegenden Arbeit die folgenden Elementgruppen (Darstellungskategorien):

- Unter Denkrahmen verstehen wir Vorstellungen übergeordneter Art zu Gegenständen, Zielen und Methoden der Physik sowie Denkschemata (z.B. Eigenschaftsdenken/Wechselwirkungsdenken) und Problemlösungsstrategien (z.B. Formelfixierung).
- Präkonzepte bezeichnen stabile inhaltliche Repräsentationen spezifischer Begriffe (wie Kraft, Elektron, Licht), einschließlich ihrer affektiven Besetzungen, sowie Erklärungsmuster für das Zustandekommen bestimmter Phänomene.
- Interessen sind überdauernde Verhaltensdispositionen, die sich in der besonderen Zuwendung zu bestimmten Tätigkeiten oder Inhalten äußern. Man kann

zwischen allgemeinen, themenübergreifenden Interessen (z.B. Interesse am Experimentieren) und themenspezifischen Interessen, die sich auf bestimmte Inhaltsbereiche beziehen, unterscheiden.

- Kenntnisse sind abrufbare Wissens Elemente, mit denen nur begrenzt inhaltliche Vorstellungen verknüpft sind. Besonders zu nennen sind Formelkenntnisse (welcher Schüler konnte nicht die Form $F = m \cdot a$) oder die Kenntnis von Lösungsalgorithmen für Standardaufgaben.
- Erfahrungen sind abgespeicherte Wahrnehmungen von beobachteten oder selbst durchlebten Situationen. Mit Erfahrungen sind in der Regel Deutungen der wahrgenommenen Situationen verbunden, die die Form von Präkonzepten annehmen können.

Die Elementgruppen, bzw. Darstellungskategorien werden unter drei Komponenten des thematischen Vorverständnisses zusammengefaßt, so daß sich die folgende Struktur ergibt, nach der in Kapitel B die Ergebnisse der empirischen Arbeiten über das Vorverständnis von Schülern zur klassischen Mechanik aufgeschlüsselt werden:

THEMATISCHES VORVERSTÄNDNIS ZUR MECHANIK

Komponente I : Denkrahmen und allgemeine Interessen

- z.B.:
- Realisationsdenken
(Widerstand gegen die Vornahme von Abstraktionen, die im Gegensatz zu Realitätserfahrungen stehen)
 - "Physik liefert eindeutige Ergebnisse"
(naiv-empiristische Vorstellungen über die physikalische Erkenntnisgewinnung)
 - Interesse an technischen Fragestellungen
(Bevorzugung praktisch-technischer Themenstellungen gegenüber der begrifflich-prinzipiellen Strukturierung von Phänomenen)

Komponente II : Präkonzepte und themenspezifische Interessen

- z.B.:
- Kraftausübung als Aktivität
(Vorstellung, daß nur belebte oder bewegte Körper eine Kraft ausüben können)
 - Interesse an der Dynamik von Bewegungen
(Bevorzugung dynamisch-energetischer Betrachtungen gegenüber solchen unter kinematischen Aspekten)

Komponente III: Kenntnisse und Erfahrungen

- z.B.:
- Formelkenntnisse
(formale Fähigkeiten im Umgang mit Formeln und Rechenalgorithmen, oft unabhängig von einem inhaltlichen Verständnis)

- Kurvenfahrten
(Man muß sich in Fahrzeugen bei schnellen Kurvenfahrten festhalten, um nicht "nach außen" getragen zu werden)

Die Komponente I des thematischen Vorverständnisses umfaßt die themenübergreifenden Charakteristika der Herangehensweise von Schülern an Sachverhalte der klassischen Mechanik, die vielfach auch für die Physik generell gelten werden. In den Komponenten II und III sind begriffs- bzw. phänomenspezifische Elemente aufgelistet. Die Vereinigung der Kategorie "Denkrahmen" mit allgemeinen Interessen zu einer Vorverständniskomponente ist wegen der engen Beziehungen sinnvoll. Nehmen wir ein Beispiel: Das allgemeine Interesse an der unterrichtlichen Behandlung praktisch-technischer Erscheinungen aus der Erfahrungswelt des Alltags korrespondiert mit einem Denkrahmen, nach dem die Physik die Aufgabe hat, Realitätserfahrungen, besonders solche aus dem technischen Bereich, genau und am Einzelfall zu erklären.

Für die Konstruktion von Erfahrungen, die zusammen mit Kenntnissen die Vorverständniskomponente III bilden, setzen wir eine für die Menschen unseres Kulturkreises ähnliche Alltagswelt voraus, da wir über keine empirischen Daten zu bestimmten Erfahrungen einzelner Schüler verfügen. Für den Bereich der Mechanik (Bewegung schwerer Dinge in Raum und Zeit, Fortbewegung) ist das relativ unproblematisch (anders als z.B. im Bereich der Atom- und Kernphysik). Auch wenn mit Kenntnissen keine, oder nur sehr begrenzt, inhaltliche Vorstellungen verbunden sind - Formeln werden oft rein instrumentell gehandhabt, ohne ihren qualitativen Kern zu verstehen - beeinflussen sie den Ablauf von Erkenntnisprozessen und gehören daher zum Vorverständnis. In der Fallstudie 2 (Punkt C.3) über eine Unterrichtseinheit nach dem Modell des SVU werden wir zeigen, wie der Versuch, die als Kenntnis vorhandene Formel $F = m \cdot a$ zur Berechnung der "Kraft" bewegter Körper heranzuziehen, eine Differenzierung des Clusterbegriffs von 'Kraft' als allgemeiner Wirkungsfähigkeit einleitete.

Bei der Auswahl von Fragestellungen in SVUs und der Schwerpunktsetzung von Schülern für Aufmerksamkeit und Engagement im Unterricht spielen Interessen in Verbindung mit den anderen Vorverständniselementen eine wichtige Rolle. Da die Bedeutung von Interessen für Denkprozesse in der Physik und den Erwerb von Kenntnissen weniger diskutiert wird als die von Präkonzepten und Interessen in Untersuchungen über Schülervorstellungen meist nur am Rande Erwähnung finden (siehe dazu Punkt A.2.3; Seite 71), widmen wir diesen Fragen einen eigenen Punkt (A.1.5).

A.1.5

Interessen als Elemente des Vorverständnisses

Wir gehen davon aus, daß das Verhalten von Schülern im Physikunterricht von Interessen mitbestimmt ist. Allgemeine und themenspezifische Interessen sind daher bei der Formulierung des thematischen Vorverständnisses zu berücksichtigen. In Anlehnung an Todt (1978, 14) legen wir fest:

Interessen sind überdauernde Verhaltensdispositionen, die sich in der besonderen Zuwendung zu bestimmten Tätigkeiten oder Inhalten äußern. Die Manifestation von Interessen unterliegt den jeweiligen Rahmenbedingungen.

Interessen wurden von uns erhoben a) durch Befragung der Schüler nach denjenigen Inhalten bzw. Tätigkeiten, die sie besonders gerne als Gegenstand des Physikunterrichts sehen würden, und b) durch Beobachtung des tatsächlichen Verhaltens der Schüler bei der Behandlung bestimmter Inhalte oder bei der Wahl eigener Zielsetzungen in selbstbestimmten Unterrichtsphasen. Die Aussagekraft der jeweils gewonnenen Schülerinteressen und ihre didaktische Bedeutung sind noch kritisch zu werten. Dies kann aber erst auf der Basis empirischer Ergebnisse erfolgen (siehe Punkt C.4.4).

Wenden wir uns hier der Frage zu, in welcher Weise Interessen in die Wechselwirkung zwischen Vorverständnis und Lehrangebot eingehen und den Aufbau neuer Wissensstrukturen beeinflussen. Eine naheliegende Annahme über den Zusammenhang zwischen Interessen und Wissenserwerb lautet: "Das, woran man interessiert ist, lernt man besser und an dem, worüber man bereits viel weiß, ist man interessiert". Die These birgt ein hohes Maß an Plausibilität in sich. Ihr erster Teil, der als sogenannte "Interessendoktrin" auf Herbart zurückgeht, wurde zu einer Leitidee vieler pädagogischer Konzepte ("Schülerorientierung", "offener Unterricht", "selbstbestimmtes Lernen").

Trotz (oder gerade wegen) der scheinbaren Evidenz lohnt sich ein genaueres Hinterfragen unter Heranziehung empirischer Ergebnisse. Das positive Einwirken von Interessen auf Lernprozesse wird oft unreflektiert vorausgesetzt (z.B. bei Steiner 1983, 9f). Bei Todt (1978), der sich anhand eigener Arbeiten und einer Analyse des psychologischen Forschungsstands mit der Frage auseinandersetzt, findet man eine kritischere Einschätzung der unmittelbaren Bedeutung geäußelter Interessen für die Förderung bestimmter Aktivitäten zum Erwerb von Kenntnissen und Fähigkeiten.

Der Zusammenhang von Fähigkeiten und Interessen stellt sich entgegen der Common sense Meinung keineswegs so klar heraus, wie man annehmen möchte. Die Konsequenz aus den Ergebnissen der Mehrzahl vorliegender Untersuchungen

lautet nach Todt (1978, 142), daß spezialisierte Interessen nur eine geringe Beziehung zu spezialisierten Fähigkeiten zeigen. Dies gelte für den Bereich der Berufe ebenso wie für den Erziehungsbereich.

Dennoch gibt es Versuche, den vermuteten positiven Zusammenhang von Interessen und Fähigkeiten durch subtile Untersuchungen (z.B. Extremgruppenanalysen) und unter Abgang von Kausalitätsannahmen nachzuweisen. Die neue Hypothese lautet: "Interessen und Fähigkeiten entwickeln sich parallel, nicht kausal" (vgl. Todt 1978, 142ff). Die empirische Absicherung ist hier ebenfalls noch nicht überzeugend gelungen.

Ein Zusammenhang von Interessen und Schulleistungen läßt sich für einige Fächer belegen. Positive Korrelationen finden sich in erster Linie bei Sport und Mathematik, aber auch bei Physik und Musik (vgl. Todt 1978, 185). Für Physik liegt die Korrelation zwischen der Fachnote und dem Wert der Skala "Technik und Naturwissenschaft" eines differentiellen Interessentests nach Todt bei Jungen höher als bei Mädchen und bei Gymnasiasten höher als bei Haupt- und Realschülern. Den höchsten Wert erreichten Gymnasiasten ($r = 0,49$; bei $N = 66$).

Über alle Fächer betrachtet fallen "die empirischen Ergebnisse nicht so eindeutig aus, wie es die sogenannte 'Interessendoktrin' erwarten läßt" (Todt 1978, 185). Selbst für Physik liegen die Werte eher im mittleren Bereich. Zum einen kann man dafür die Unzulänglichkeiten von Leistungsbewertungen durch Schulnoten verantwortlich machen. Für die Erklärung wesentlicher erscheint mir die Annahme eines nur mittelbaren Zusammenhangs zwischen Interessen und Interessenmanifestationen in Lernhandlungen (vgl. das Modell von Düker). In der Schule ist in die Vermittlung eine ganze Reihe von Faktoren eingeschaltet, die die Beziehung zwischen sachbezogenen Interessen an Physik und schulfachbezogenen Manifestationen noch indirekter werden lassen. Eine Untersuchung von Todt (1978, 192) zeigt, daß das naturwissenschaftliche Schulklima, die Berufswichtigkeit der Physik und die bisherige Note im Fach die Beziehung wesentlich mitbestimmen.

Joerger (1980, 39) fragt sich bei der Diskussion der Todtschen Ergebnisse, ob nicht Interessen sehr spezifisch auf bestimmte Tätigkeiten und Inhalte ausgerichtet sein können, ohne sich auf den Gesamtbereich zu beziehen, zu dem sie systematisch gehören. Dagegen spricht jedoch die für Gymnasiasten belegte hohe Korrelation zwischen "molaren" (globalen) und "molekularen" (spezifischen) Items von Interessentests (vgl. Todt 1978, 51).

Mikelskis (1979, 187f) hat sich mit dem Zusammenhang von Motivation mit Kenntnissen und Einstellungen am Beispiel einer Unterrichtseinheit über Kern-

kraftwerke befaßt. Der verwendete Begriff "sachbezogene Motivation" ist "Interesse" verwandt. Der Vergleich von Lernzuwächsen und themenspezifischer sachbezogener Motivation bei 11 Gymnasialklassen ergab keinerlei Zusammenhang. Die Klassen mit mittleren Motivationswerten wiesen die geringsten Lernzuwächse auf. Geringe oder hohe Motivation führten zu den größten Lernerfolgen. Zur Erklärung dieses "überraschenden Effekts" zieht Mikelskis zusätzliche Informationen über das jeweilige Umfeld des Unterrichts heran. Dieses Vorgehen unterstreicht den Sinn der Annahme eines nur mittelbaren Zusammenhangs zwischen Interessen und Lernaktivität.

So weit zur kritischen Hinterfragung des Einflusses von Interessen auf Kenntnisse/Fähigkeiten/Leistungen, für die wir auf empirische Untersuchungen rekurriert haben. Ein positiver Zusammenhang kann demnach nicht a priori vorausgesetzt werden. Er ist vielmehr selbst zum Gegenstand der Reflexion zu machen.

In einem Modell zum Zustandekommen von Wißbegier führt Krieger (1976) die Kategorie "Wertorientierungen" ein, aufgrund derer das Individuum Entscheidungen über die Relevanz einer Situation oder eines Problems trifft. Kriegers Arbeit ist eine Kritik an der Theorie der intrinsischen Motivation, nach der Wißbegierde oder Neugierverhalten im Idealfall allein durch die Reizmerkmale des Phänomens induziert werden. Krieger zeigt die ideologische Funktion des pädagogischen Postulats der intrinsischen Motivation auf (Wertfreiheit, zweckblinde Hingabe) und versucht an Beispielen nachzuweisen, daß es durch unzureichend interpretierte Befunde psychologisch legitimiert wird. Empirische Erhebungen Kriegers belegen, daß weniger Reizmerkmale (Diskrepanzen zur Erwartungshaltung) als vielmehr die Erfüllung des Relevanzkriteriums Wißbegier bewirkt.

Für Krieger sind Interessen funktionale Gebilde der Erfordernisse der Realisierung des idealen Selbstbildes. Er betrachtet Wertorientierungen als Grundlage der Relevanzentscheidung.

Situationsspezifisches Ego-Involvement läßt sich nicht ohne weiteres aus der Interessenstruktur vorhersagen, da Interessen möglicherweise anderen motivationalen Strukturen untergeordnet sind.
(Krieger 1976, 119)

Nach Krieger stellt das Individuum ein Problem sinnvollerweise in einen Zusammenhang mit der von ihm angestrebten privaten oder beruflichen Perspektive. Die Überlegungen sind im folgenden Schema veranschaulicht (Abb. A2):

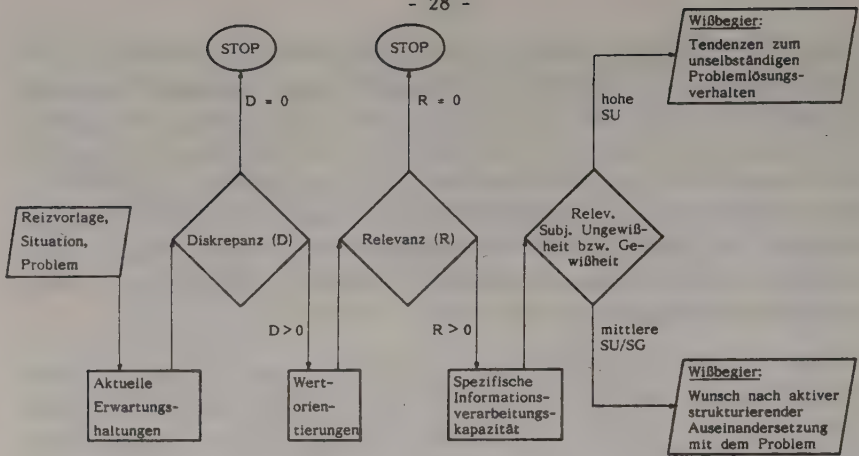


Abb. A2: Determinanten der Wißbegier (nach Krieger 1976, 122)

Joerger (1980) setzt Wißbegierde und Interesse im Grunde genommen gleich. Er formuliert die These:

$$I_k = B_k / U_k$$

In Worten: Das Interesse am Sachbereich k ist um so größer, je mehr Details aus dem Sachbereich wir zu kennen glauben und je weniger Details wir als unbekannt identifizieren.

(Joerger 1980, 42)

Er erweitert diese mehr durch Plausibilitätsannahmen und Fallbeispiele als durch empirische Erhebungen belegte These unter Bezug auf Krieger um die Annahme, der Maximalwert der Aktivierung variere mit der subjektiv eingeschätzten Bedeutsamkeit des Problems (vgl. Joerger 1980, 58). Joerger faßt Interessen als Ausfluß der Wechselwirkung von Diskrepanzstärke und Relevanzbeurteilung auf. Er wertet hohe Wißbegierde direkt als hohes Interesse. Kriegers Einführung der Relevanzentscheidung dient jedoch gerade der Erklärung der Befunde, daß auch Tätigkeiten, denen geringes Interesse entgegengebracht wird, große Wißbegier auslösen können, wenn sie aus anderen Gründen (Beitrag zur Verwirklichung des idealen Selbstbildes) der Person wichtig erscheinen. Für uns zählen Interessen als dispositionale Elemente zum Vorverständnis. Verwendet man "Interesse" im durch differentielle Interessentests Todtscher Art operationalisierten Sinn, so kann man Wißbegierde nicht mit Interesse gleichsetzen.

Wir können die Relevanzentscheidung in unser Modell des Erkenntnisprozesses einpassen:

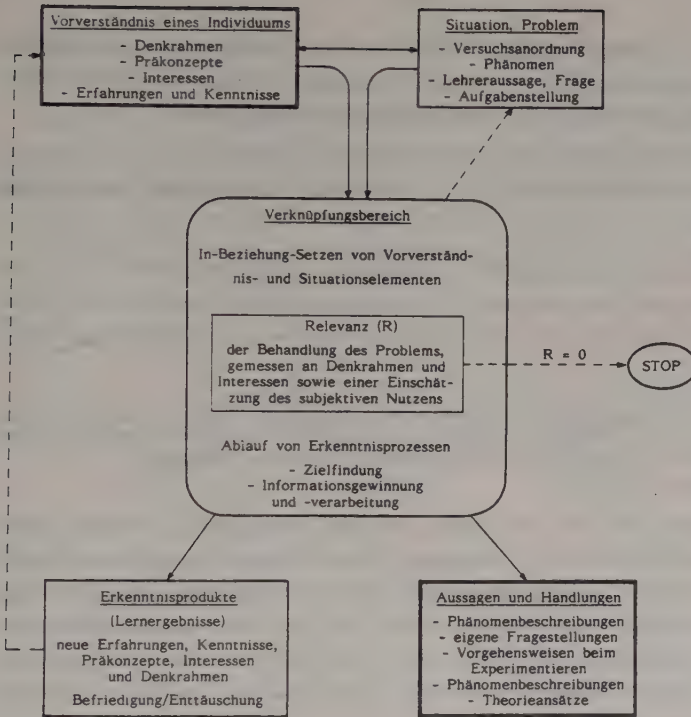


Abb. A3: Wechselwirkung von Vorverständnis und Situation im Erkenntnisprozeß unter Einbeziehung der Relevanzentscheidung

Grundlage der Relevanzentscheidung sind Elemente der Vorverständniskomponenten "Denkrahmen" und "Interessen". Dazu tritt eine durch den vom Schüler erfahrenen Physikunterricht geprägte Vorstellung von erfolgreichen unterrichtlichen Verhaltensstrategien. Elemente dieser Kategorien können im Widerstreit miteinander liegen. Die Einschätzung des subjektiven Nutzens bestimmter Aktivitäten wird in der Schule durch pragmatische Überlegungen zur Leistungsbewertung beeinflusst. Ein Unterricht, der sich zum Ziel gesetzt hat, Schüler zur selbständigen Auseinandersetzung mit Phänomenen eigener Wahl anzuregen, wird dies nicht einfach durch Freigabe der Themenstellung erreichen, wenn andere Randbedingungen, insbesondere die Benotung, konventionell aufrechterhalten bleiben. Für Schüler muß erkennbar sein, daß eigenständige Themenwahl und Erklärungsansätze auch "honoriert" werden.

Ein Beispiel aus unseren empirischen Erhebungen soll das verdeutlichen: In Befragungen im Anschluß an SVU s, in denen die Schüler selbstgewählte Themen bearbeiten konnten, äußerten sich Schüler häufig in folgender Weise:

"Spaß gemacht hat das schon, weil man selbst entscheiden konnte, was man machen will. Aber man kann das nicht zu oft machen, weil man dann zu wenig lernt."

Die eigenen Interessen an speziellen Themen und an selbstorganisierten Arbeitsformen werden hier einem subjektiv (im Hinblick auf Klausuren oder das Abitur) als relevanter eingeschätzten konventionellen Lernen des Stoffkatalogs untergeordnet.

Sachbereichsspezifischer Anreiz und Relevanz eines Wißbegier-Objekts sind nicht unbedingt kongruent, und die Relevanzentscheidung kann den Effekt des sachbereichsspezifischen Anreizes überlagern.
(Krieger 1976, 207)

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß der Zusammenhang zwischen Interessen und Lernaktivitäten in empirischen Untersuchungen weniger stark durchschlägt, als man aus Plausibilitätsüberlegungen vermuten könnte. Eine Erklärung des nur mittelbaren Zusammenhangs wird durch die von Krieger eingeführte Instanz der Entscheidung des Individuums über die Relevanz eines Problems möglich. Wir können Kriegers Ergebnisse zur Verfeinerung unseres Modells vom Erkenntnisprozeß heranziehen.

Wir haben bei der Diskussion des Einflusses auf Lernaktivitäten über Interessen vorwiegend im Sinne von geäußerten Verhaltensdispositionen gesprochen. Adäquates Erhebungsinstrument ist ein Interessentest, in dem Schülern mögliche Inhalte des Physikunterrichts (z.B. "Im Treppenhaus die Fallzeiten unterschiedlich schwerer Körper messen") zur Bewertung vorgelegt werden. Im Vorverständnis-konzept spielen ebenso solche Interessen eine Rolle, die den Schülern selbst wenig bewußt sind und die kaum von ihnen direkt geäußert werden. Hypothesen wie "Interesse an Formeln" oder "Interesse an Gedankenexperimenten" werden nicht aus Befragungen gewonnen, sondern aus der unmittelbaren Beobachtung dessen, was Schüler bevorzugt im Unterricht tun möchten, wonach sie von sich aus fragen, welche Themen sie sich für selbstbestimmte Gruppenarbeitsphasen wählen usw. Die Konstruktion der Interessen erfolgt hier ganz analog zu der von Präkonzepten (vgl. Punkt A.1.2). So gewonnene Vorverständniselemente stehen in einem eindeutigen Bezug zum Unterricht, weil sie selbst aus der Analyse von Unterrichtsverläufen, über die uns umfangreiches Material zur Verfügung steht, gewonnen wurden. Befragungen können nur potentielle Verhaltensweisen erheben. Wie sich ein Schüler in einer Situation tatsächlich verhält, an der er

großes Interesse geäußert hat, muß offen bleiben. Fragebögen haben dafür den Vorteil, daß sie den Inhalt oder die Tätigkeit in Reinform zur Bewertung stellen, unabhängig von zufälligen Randbedingungen einer späteren unterrichtlichen Realisierung. Die Frage, welche Erhebungsmethode vorzuziehen ist, d.h. welchermaßen gewonnene Aussagen über Interessen sich als Vorverständniselemente bei der Rekonstruktion von Schülerverhalten besser bewähren, bleibt im Rahmen der inhaltlichen Darstellung des Vorverständnisses zur Mechanik zu beantworten.

A.2

Querverbindungen des Begriffs "Vorverständnis" zur
Philosophie, Wissenschaftstheorie und Didaktik

A.2.1 Vorverständnis und Vorurteil -

Querverbindungen zur Philosophie

Vorverständnisse führen immer auch zu Vor-Urteilen bezüglich behandelnswerter Fragestellungen, problemrelevanter Beobachtungen, erfolgversprechender Erklärungsansätze usw. Mit dem Begriff "Vorurteil" verbindet sich eines der Grundprobleme der Philosophie: Inwieweit beruht unsere Erkenntnis auf tatsächlichen Merkmalen des Erkenntnisgegenstandes und inwieweit auf der Struktur unseres Erkenntnisapparates (Sinneswahrnehmung, Gehirnstrukturen, Sprache)? Im Konstrukt des individuellen Vorverständnisses erkennen wir die prinzipielle und notwendige Vorurteilsbehaftetheit des menschlichen Denkens an. Der folgende Abschnitt stellt Verbindungen zwischen dem didaktischen Konstrukt "Vorverständnis" und der philosophischen Kategorie des "Vorurteils" her.

Die Auseinandersetzung der Philosophie mit dem Vorurteil hat verschiedene Entwicklungsstufen durchlaufen. Unsere Einteilung in vier Phasen kann sowohl systematisch als auch chronologisch gelesen werden.

1. Das Vorurteil als zu überwindende und überwindbare Verblendung menschlichen Erkennens (Bacon, Descartes).
2. Das Vorurteil als Teil des menschlichen Wesens, das durch die Instanz der "reinen Vernunft" offengelegt und abgebaut werden kann (Kant).
3. Das Vorurteil als notwendiges Übel (Hegel, Nietzsche).
4. Das Vorurteil als notwendige Voraussetzung des Erkennens (Heidegger, Gadamer).

Wenn wir von "Vorurteil" sprechen, meinen wir das philosophische Vorurteil. Es ist vom trivialen Vorurteil zu unterscheiden. Zur Semantik des Wortes "Vorurteil" schreibt Jankowitz (1975, 5):

Im antiken Griechenland wurde "Vorurteil" in der Bedeutung von Meinung, Ahnung, Vermutung, oder auch von Verdacht, Argwohn umgangssprachlich verwendet. Diese Bedeutungen bringen somit eine Vorläufigkeit der jeweils bezeichneten Überzeugungen zum Ausdruck. Die Römer kennzeichneten danach durch "praeiudicium" denn auch das, was dem eigentlichen Urteil voraus ging. Die Grundlage jenes Vorurteils war nicht die zu beurteilende Sache oder Person, sondern frühere Urteile und Erfahrungen. (...) Erst als das Wort aus dem Lateinischen entlehnt zum englischen "prejudice" wurde, bekam es den Sinn eines vorschnell und fahrlässig gefällten Urteils. So kam es zu der heutigen, trivialen Bedeutung des Wortes "Vorurteil", die neben den erwähnten besonders das impulsiv wertende Moment meint, das eine echte Überlegung ersetzt.

Im Verlaufe der vier von uns aufgestellten Stufen der Auseinandersetzung mit

dem Vorurteil in der Philosophie vollzieht sich eine Rückbesinnung vom vor-schnellen, fahrlässigen Trivial-Vorurteil auf das philosophische Vorurteil als Horizont und Basis des Erkennens.

Seit Bacon und Hume gibt es in der Philosophie eine Grundströmung, die das Ideal einer vorurteilsfreien Wissenschaft anstrebt. Ihren Höhepunkt fand diese Bewegung in der Kantschen Idee der "reinen Vernunft". In seinem Buch "Philosophie und Vorurteil" (1975) weist Jankowitz nach, daß die Forderung nach Vorurteilsfreiheit und der dahinterliegende Glaube an die Überlegenheit eines solchen Denkens selber Vorurteile sind. Die Versuche von Descartes, Kant, Fichte vorurteilsfreie Philosophien zu begründen, kommen dann in Schwierigkeiten oder verfallen auf willkürliche Setzungen, wenn trotz der zumeist erkannten Vorurteilsbehaftetheit des Menschen die Möglichkeit der Schaffung einer vorurteilsfreien Philosophie über vorurteilsfreie Wissenschaft begründet werden soll. So muß Descartes "gestehen, mit einer Erkenntniskraft geboren zu sein, ... die Beweisführungen ... aus eigener Kraft selbst zu finden", ihn in die Lage versetze (Descartes nach Jankowitz 1974, 41).

Gadamer befindet über das Vorurteil der Aufklärung:

(Das) grundlegende Vorurteil der Aufklärung ist das Vorurteil gegen die Vorurteile überhaupt und damit die Entmachtung der Überlieferung.
(Gadamer nach Keller 1982, 89)

Die Erkenntnistheorien Descartes und Bacons beruhen, ebenso wie die damalige Naturwissenschaft, auf drei Annahmen, von denen zumindest die beiden ersten heute noch in der Philosophie der Erkenntnis anzutreffen sind (z.B. bei Bollnow, vgl. S. 46 dieses Kapitels):

1. Es gibt eine feststehende Naturordnung, für deren Ergründung nur eine allgemeingültige, absolute Form der Erkenntnisgewinnung angemessen ist.
2. Erkennender Geist (aktiv) und zu erkennende Ordnung (passiv) sind vollkommen trennbar.
3. Die ideale Form einer Theorie über die Natur ist die der euklidischen Geometrie, d.h. eines Systems von Ideen, deren Gültigkeit a priori bewiesen werden kann.

(vgl. Toulmin 1978, 27)

Bacon, der glaubte, man könne den Vorurteilscharakter von Grundannahmen dadurch beseitigen, daß man durch strenge Regeln und Gesetze der Phantasie Einhalt gebietet, hielt Vorurteile für Ausflüsse der Ungeduld, des Aberglaubens und der Anmaßung des Menschen.

Auch Kant vermochte am Vorurteil nichts Nützliches, Erkenntnisförderndes zu

erkennen. Er sah darin, wie Bacon, nur Eitelkeit, Bequemlichkeit und Eigenliebe (vgl. Jankowitz 1975, 45ff).

Hegel erkannte an, daß die Vorurteile zum Wesen des Menschen gehören. Danach konnte es für ihn keine "reinen Begriffe" geben. Bestimmend für die Vorurteilsstruktur des Menschen sei die Sprache, die in sein Empfinden und Anschauen eindringe.

Nietzsche geht einen entscheidenden Schritt weiter, wenn er die Vorurteile als ein "notwendiges Übel" für das Überleben der Menschen hält.

Gerade da, wo sie am wenigsten vermutet werden, behauptet Nietzsche die Vorurteile. Das scheinbar gänzlich Vorurteilslose, die Mathematik und die Naturwissenschaften gibt es nur, weil der Mensch sie nötig hat zur Bewohnbarmachung der ihm fremden Welt. "Unsere subjektive Nötigung an die Logik zu glauben, drückt nur aus, daß wir längst bevor uns die Logik selber zum Bewußtsein kam, nichts getan haben, als ihre Postulate in das Geschehen hineinzulegen: jetzt finden wir sie in dem Geschehen vor - wir können nicht mehr anders - und vermeinen nun, diese Nötigung verbürge etwas über die 'Wahrheit'". (Jankowitz 1975, 144)

Eines der wichtigsten Vorurteile, die wir in das Geschehen der Natur gelegt haben und nun in ihr wiederfinden, ist das der Kausalität.

Die neuere marxistische Philosophie erkennt zwar das Fungieren von Vorurteilen an, ist aber dem Kantschen Ideal der "reinen Vernunft" verpflichtet. Unter dem Stichwort 'Vorurteil' finden wir im Wörterbuch "Philosophie und Naturwissenschaft" (Hörz 1968, 973):

Eine Analyse von Vorurteilen im wissenschaftlichen Erkenntnisprozeß muß davon ausgehen, daß jede neue Erkenntnis auch auf der Grundlage bisheriger Erkenntnisse gewonnen wird und daß sich der erkennende Mensch über neu zu gewinnende Erkenntnisse oft auf dieser Basis bereits ein mehr oder weniger vages, vorläufiges, "intuitives" Urteil bildet, noch bevor der entsprechende Erkenntnisprozeß abgeschlossen ist. Dabei entstehen zwangsläufig auch Vorurteile, die nicht selten hemmend wirken, mitunter aber auch erkenntnisfördernd sind. Der Erkenntnisfortschritt insgesamt erweist sich als ein Prozeß zunehmender Beseitigung von Vorurteilen.

Vorurteile werden hier ambivalent gesehen: "nicht selten hemmend, mitunter aber auch erkenntnisfördernd". Die Widerspiegelungstheorie wird von Einsichten in die Realität wissenschaftlicher Erkenntnistätigkeit langsam eingeholt. Uns scheint die ambivalente Sichtweise u.a. auf eine mangelnde Differenzierung zwischen dem trivialen und dem philosophischen Vorurteil zurückzuführen zu sein.

Von besonderer Bedeutung für die Vorurteilhaftigkeit menschlichen Denkens und

Erkennens ist die Sprache, worauf Hegel hingewiesen hat. Vorangetrieben wurde diese Einsicht durch die sprachphilosophischen Arbeiten Humboldts, der die enge Verbindung von Sprache und Weltanschauung untersuchte. Der Zusammenhang von Sprache und Erkenntnis hat zwei Aspekte. Zum einen nehmen gewonnene Erkenntnisse erst durch Sprache eine mitteilbare und kritisierbare Gestalt an. Das verfügbare Wortsystem begrenzt dabei die Ausdrucksmöglichkeiten und führt immer zu einer Transformation des Gedachten. Worte sind vorurteilsbeladen. Sie erwecken zusammen mit einem Begriffsinhalt Assoziationen, Gefühle, Verwendungskontexte usw. Zudem besteht keine eindeutige Zuordnung von Wort und Begriff. Sprachliche Zeichen, wie z.B. "Kraft", können verschiedene Begriffe aktivieren: Kraft als Wechselwirkung zweier Körper in einer Fernwirkungstheorie, Kraft als Einwirkung auf einen Körper in einer Feldtheorie, Kraft als Körperstärke im Alltagsverständnis. Der beim Empfänger erweckte Begriffsinhalt hängt von dessen Vorverständnis, d.h. von dessen Vorurteilsstruktur ab.

Was zunächst für Worte gesagt wurde, gilt natürlich auch für Begriffe. Begriffe stehen in Traditionen. Der Newtonsche Fernwirkungs-Kraftbegriff impliziert als Vorurteilsbasis Punktmassen, instantane Wirkung, absolute Zeit und absoluten Raum. Das alles wird bei Aktivierung des Begriffs verdeckt mitgedacht.

Viel mehr noch als bei den definierten Begriffen einer Wissenschaftssprache kommt die Vorurteilsstruktur von Sprache, die Totalität des beim Sprechen Mitgedachten und Mitgemeinten, bei den natürlichen Sprachen zum Vorschein. Betrachten wir die Situation des Übersetzens. Es gibt keine ein-eindeutigen Abbildungen, keine wort-wörtlichen Übersetzungen eines Textes von einer Sprache in eine andere, selbst zwischen Sprachen eines Kulturkreises nicht. Streng genommen ist kein Text wirklich übersetzbar, denn man müßte zusätzlich zu den sprachlichen Zeichen die Denkungsart mitübersetzen, d.h. die mit den Zeichen und Begriffen verbundenen Vorurteilsstrukturen.

Die Bedeutung der Alltagssprache für die Naturwissenschaft ist nicht zu unterschätzen. Beschreibungen von Phänomenen und Experimenten kommen ohne Rückgriffe auf die als vorurteilsbeladen erkannte Muttersprache nicht aus, wie Heisenberg und Weizsäcker bestätigen (vgl. Gipper 1971, 50). Aus diesen Zusammenhängen erklärt sich die Motivation für den Versuch der Konstruktivisten der "Erlanger Schule", eine vorurteilsfreie Wissenschaftssprache zu schaffen, um dem Ideal der vorurteilsfreien Wissenschaft näherzukommen.

Für das Problem der Methode unseres Denkens müssen wir uns in einen Zustand ohne Schiff, d.h. ohne Sprache versetzen, und müssen versuchen, die Handlungen nachzuvollziehen, mit denen wir - mitten im Meer des Lebens schwimmend - uns ein Floß oder gar ein Schiff erbauen können. (Lorenzen 1974, 172)

Nach meiner Einschätzung zimmern die Konstruktivisten erst am Floß.

Noch bedeutsamer als der erste Aspekt des Zusammenhangs von Sprache und Erkenntnis (Vorurteilsstruktur der Sprache) ist der zweite: Sprache als Vorurteilsstruktur. In Fortführung der Gedanken Humboldts haben die amerikanischen Linguisten Sapir und Whorf das Verhältnis von Sprache und Weltsicht empirisch untersucht. Whorf formulierte auf der Basis ethnolinguistischer Forschungen über Indianersprachen die Hypothese der "sprachlichen Relativität". Danach bestimmt unsere Muttersprache, wie wir die Welt wahrnehmen. Nicht die Welt der Phänomene, sondern das Sprachsystem liefere uns die Kategorien, nach denen wir den ungeordneten Strom der Sinneseindrücke organisierten.

Whorf verweist selbst auf die Bedeutung seiner These für die moderne Naturwissenschaft:

It means, that no individual is free to describe nature with absolute impartiality but is constrained to certain modes of interpretation even while he thinks himself most free. (...) We are thus introduced to a new principle of relativity, which holds that all observers are not led by the same physical evidence to the same picture of the universe, unless their linguistic backgrounds are similar, or can in some way be calibrated.

(Whorf nach Schaff 1973, 64)

"Linguistic background" schließt die Wissenschaftssprache einer Forschergemeinschaft ein. Damit leiten Muttersprache und Wissenschaftssprache als Vorurteilsstrukturen die geistigen Aktivitäten der in einer Forschergemeinschaft arbeitenden Physiker. Die Möglichkeit der Kommunikation zwischen amerikanischen und deutschen Physikern weist darauf hin, daß es gelingt, Brücken zu schlagen zwischen den sprachlichen Hintergründen (gemeinsamer Kulturkreis, die "Sprache" des Experiments, gemeinsame Wissenschaftssprache).

Aus den umfassenden Untersuchungen Whorfs über Indianersprachen wollen wir einige Belege für die These der "sprachlichen Relativität" aufgreifen. Whorf, der eine Ausbildung als Chemieingenieur besaß, betont in seinem Hauptwerk "Sprache, Denken, Wirklichkeit" (1963) immer wieder die Bedeutung seiner Forschungsergebnisse für die moderne Naturwissenschaft, besonders für die Physik. So behandelt er ausführlich die Begriffe Raum und Zeit in der Hopi-Sprache und der indoeuropäischen Sprachengruppe. Die Sprache der Hopi-Indianer enthält keinerlei grammatikalische Formen, die sich direkt auf das beziehen, was wir "Zeit" nennen. Hopi-Verben sind zeitlos, sie haben keine Vergangenheits-, Gegenwarts- oder Zukunftsformen. Whorf schließt daraus auf den Zeitbegriff der Hopi:

Eine der Eigentümlichkeiten der Hopi-Zeit ist: sie wechselt mit jedem

Beobachter, erlaubt keine Gleichzeitigkeit und hat 0 Dimensionen, d.h. man kann ihr keine Zahl zuteilen, die größer als 1 ist. Die Hopis sagen nicht, "Ich blieb fünf Tage", sondern "Ich ging am fünften Tag weg". Für Worte, die sich auf diese Art Zeit beziehen, wie das Wort "Tag", gibt es keinen Plural.
(Whorf 1963, 15)

Die Hopigrammatik kennt keine Aufteilung des Universums in einen dreidimensionalen Raum und eine konstant fließende eindimensionale Zeit. Sie drückt Gegenwärtiges, Vergangenes und Zukünftiges durch Aspekte aus (Tatsachenaussage, Erwartung, Zuschreibung von Subjektivität zu einem Ereignis). Der Raumbegriff ist dem unseren ähnlicher, wenn die Hopi auch keinen imaginären Raum kennen (wie z.B. "das Ideengebäude der Physik"). Whorf führt aus, daß die Hopi dennoch alle beobachtbaren Phänomene in einer pragmatischen Weise korrekt beschreiben können. Ebenso wie es verschiedene Geometrien gäbe, seien auch verschiedene Weltkategorisierungen möglich. Newtons Begriffe von Raum, Zeit und Materie seien nicht die natürliche Anschauung des Universums.

Newtons Raum, Zeit und Materie sind gar keine Anschauungen. Es sind Derivate aus Kultur und Sprache. Dies sind die Quellen, aus denen Newton sie hatte.
(Whorf 1963, 94)

Die moderne Naturwissenschaft sei ohne die Grammatik der indoeuropäischen Sprachen nicht in der vorliegenden Form entstanden. Aus der Wechselwirkung des in der Sprache objektivierten Zeitbegriffs dieser Sprachengruppe mit der Kultur als Ganzes seien das Interesse an genauer Reihenfolge, Datierung, Kalender, Chronologie, Uhren, Zeitlöhne, Zeitmessung und schließlich der klassische physikalische Begriff der Zeit entstanden.

Whorf hat eine auf der Hopi-Sprache und der Hopi-Metaphysik beruhende Physik entworfen, die seiner Meinung nach ausgezeichnet arbeiten würde (vgl. Whorf 1963, 17). Darin gäbe es z.B. keinen Geschwindigkeitsbegriff als Verhältnisgröße aus Weg und mathematischer Zeit, da die Hopi keine meßbaren Zeitintervalle kennen. An seine Stelle träte ein Basisbegriff "Intensität der Bewegung". Es gäbe keine absoluten, sondern nur relative "Geschwindigkeiten", die im Verhältnis zu einer Richtintensität benannt werden würden. Die Hopi-Sprache ist reich an Ausdrucksmitteln für Intensitätsvergleiche.

Auch wenn wir dahingestellt lassen, ob eine Hopi-Physik genauso erfolgreich wäre, wie die der indoeuropäischen Sprachengruppe (der Erfolg wäre an den sicherlich nicht identischen Zielen zu messen), müssen wir feststellen, daß ein unauflösbarer Zusammenhang zwischen Sprache, Weltbild und Naturwissenschaft besteht. Die Sprache, hier die indoeuropäische Sprachenfamilie, ist ein Grundvoraussetzungen für unser Erkennen.

Wir gliedern und ordnen die mit- und nacheinander auftretenden Ereignisse vornehmlich deshalb gerade so, wie wir es tun, weil wir durch unsere Muttersprache an einem Abkommen darüber beteiligt sind, nicht aber weil die Natur selbst etwa in genau dieser Weise und für jedermann gegliedert ist.
(Whorf 1963, 40)

Chinesische und türkische Physiker sprechen dieselbe Wissenschaftssprache der Physik und verfügen über dieselbe Weltsicht wie amerikanische oder deutsche, weil sie das System in toto übernommen haben, nicht etwa, weil sie es von ihrem muttersprachlichen Horizont aus aufgebaut haben.

Das Auseinanderfallen von Wissenschafts- und Alltagssprache verweist auf die Unterschiedlichkeit von naturwissenschaftlichem und alltäglichem Weltbild. Ein Schüler, der Physik lernen will, muß erkennen, daß er nicht einfach eine andere Beschreibung für das Weltbild erwirbt, das er in den Unterricht aus dem Alltag mitbringt, sondern daß er eine neue Sicht der Welt entwickelt. Sonst wird er den Sinn physikalischer Begriffsbildung nicht erkennen und die Wissenschaftssprache für eine unverständliche Verkomplizierung des Einfachen, Bekannten halten. Auf die Bedeutung dieser Feststellung für das Lernen von Physik werden wir später ausführlicher eingehen (siehe Punkt B.3.2.1, Seite 128ff).

Die These der sprachlichen Relativität ist in der deterministischen Schärfe von Whorfs Formulierung umstritten (vgl. Carroll 1963). Der Schluß von einer festgestellten Sprachstruktur auf eine Sichtweise der Welt ist spekulativ. Der Nachweis, ob Mitglieder der entsprechenden Sprachgemeinschaft die Welt tatsächlich nur so sehen können, ist empirisch nicht eindeutig belegt. Die Formulierung Sapirs, wonach Sprache die Weltsicht anleitet (Whorf: bestimmt), ist in der Linguistik jedoch allgemein anerkannt und stützt unsere These der Vorurteilsstruktur von Sprache ausreichend.

Die vierte Stufe der Auseinandersetzung der Philosophie mit dem Vorurteil besteht in der Anerkennung seiner erkenntnisfördernden, ja erkenntnisbedingenden Funktion. Zunächst erscheint dies als ein Rückschritt hinter die Aufklärung. Keller (1982, 89) schreibt:

Angesichts der Verurteilung der Vorurteile durch Kant fällt es auf, wenn heute eine Auffassung anzutreffen ist, die Kant für seine Zeit bereits als überholte Frage angesehen hat, nämlich die, daß man Vorurteile hinzunehmen habe. (...) Diese billigende Einstellung Vorurteilen gegenüber findet sich bei einigen Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie, die sonst sehr entgegengesetzte Auffassungen vertreten.

Keller nennt die Hermeneutik, die sprachanalytische Philosophie (s.o.), den kritischen Rationalismus und die "Kritische Theorie" der Frankfurter Schule. Wir

wollen uns jetzt der hermeneutischen Philosophie zuwenden.

Wir halten die Hermeneutik deshalb für naturwissenschaftliche Erkenntnisprozesse bedeutsam, weil die Erkenntnistätigkeit des Forschers bei der Interpretation von (Meß-) Daten der "Kunstlehre der Auslegung von Schriftdenkmälen" (Diltheys Definition der Hermeneutik) durchaus ähnlich ist. Bei aller notwendigen Sicherheit in den Theorien und Methoden seiner Disziplin braucht der Naturwissenschaftler "schöpferische Phantasie" (vgl. Planck 1931, 17ff), wenn er Meßprotokolle analysiert. "Die Meßdaten schreiben nie eine bestimmte 'Kurve' vor", fährt Planck fort. Auch ein wohlverstandener Induktivismus kommt ohne Intuition und Spekulation bei der Erkenntnisgewinnung nicht aus: "Weder Induktion noch Deduktion schaffen neue Erkenntnisse, sie sichern nur die Widerspruchslosigkeit" (Mach 1917, 312). Die notwendige Voraussetzungshaftigkeit der schöpferischen Phantasie ist Gegenstand der Hermeneutik.

Nach Heidegger vollzieht sich jede Erkenntnis im Rahmen des In-der-Welt-Seins aufgrund einer vorgängigen Interpretation der Welt (vgl. Heidegger 1977, 84). Der "vorgängigen Interpretation" entspricht, bezogen auf einen bestimmten Erkenntnisprozeß, in unserer Sichtweise das Vorverständnis. Keller überträgt den hermeneutischen Zirkel auf die Naturwissenschaft und exemplifiziert den Begriff "Vorverständnis", der in Heideggers Hauptwerk "Sein und Zeit" nicht direkt vorkommt, an folgendem Beispiel:

Ich kann etwas nur als ein Bolometer erkennen, wenn ich zuvor weiß, daß ein "Bolometer" ein Gerät zur Messung der Energie von Licht und Infrarotstrahlung bezeichnet; auch muß ich ungefähr wissen, wie das funktioniert, damit ich an der Anordnung der Meßvorrichtung deren Zweck und daran das Gerät erkennen kann. Dazu muß mir aber auch bekannt sein, daß Lichtstrahlung meßbare Energie enthält usw. Dies alles gehört zum "Vorverständnis", ohne das ein Vorstellen nicht möglich wird.

(Keller 1982, 90f)

Keller sieht Vorverständnis und Verständnis in einer Wechselbeziehung verbunden, die er als "hermeneutische Spirale" (statt "hermeneutischer Zirkel") bezeichnet. Danach wird jedes Verständnis zu neuem Vorverständnis für einen neuen Erkenntnisprozeß.

Für Heidegger ist das Bestehen des hermeneutischen Zirkels kein notwendiges Übel. Im Gegenteil: erst durch sein Bestehen wird Erkenntnis möglich.

Das Entscheidende ist nicht, aus dem Zirkel heraus-, sondern in ihn nach der rechten Weise hineinzukommen. Dieser Zirkel des Verstehens ist nicht ein Kreis, in dem sich eine beliebige Erkenntnisart bewegt, sondern er ist der Ausdruck der existenzialen Vor-Struktur des Daseins. (...) In ihm verbirgt sich eine positive Möglichkeit ursprünglichsten Erkennens. (Heidegger 1977, 203)

Damit ist das Vorurteil als erkenntnisnotwendig erkannt.

Zwei Einwände drängen sich an diesem Punkt auf. Sind nicht die Reproduzierbarkeit, die intersubjektive Überprüfbarkeit, der offensichtliche Erfolg auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen beruhender Handlungen Beweise für Vorurteilsfreiheit? Und sind nicht naturwissenschaftliche und philosophische Erkenntnis vollkommen verschiedene Dinge?

Eine Antwort auf diese Einwände hat den ganz eigentümlichen Doppelcharakter naturwissenschaftlicher Erkenntnisse zu berücksichtigen, der darin besteht, daß die Ergebnisse objektiv sind (im Sinne von intersubjektiv prüfbar), während der Weg zu ihrer Gewinnung (Erkenntnistätigkeit) und vor allem die Auswahl der Erkenntnisziele starke subjektive Merkmale zeigen. Die Objektivität der Erkenntnisse ist nicht als Denknötigkeit zu verstehen. Gemeint ist, daß in einer bestimmten Entwicklungsstufe der Disziplin und einer bestimmten historisch-gesellschaftlichen Situation bestimmte Sätze so weit verbreitet und anerkannt sind, daß ein breiter Konsens der Vorurteile herrscht, der bestimmte Fragen als gelöst erscheinen läßt. Dieser Konsens kann durch das Auftreten von Anomalien wieder gestört und aufgebrochen werden.

Die Reproduzierbarkeit naturwissenschaftlicher Ergebnisse führt Holzkamp (1968, 99) auf Realisationshandlungen zurück. Die Realisation ist Ergebnis eines aktiven, verändernden Eingriffs in die Realität. Es werden Bedingungen geschaffen, unter denen die Aussage gilt:

Der Umstand, daß manche Allgemeinaussagen durch die "Erfahrung" immer wieder bestätigt werden, ist ... auf die Tatsache zurückzuführen, daß durch Realisationshandlungen zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten immer wieder weitgehend die gleichen Bedingungen aufgesucht oder hergestellt werden konnten, nämlich die Bedingungen, unter denen bei Abwesenheit störender Umstände eine Allgemeinaussage ... Geltung hat.

Wir akzeptieren nicht die grundsätzliche Unterscheidung, die Gadamer zwischen den Natur- und den Geisteswissenschaften in der Weise vornimmt, daß erstere einen Gegenstand a priori haben, von dem her sie sich teleologisch begreifen können, was für die letzteren nicht gelte (vgl. Gadamer in Hauff 1972, 54f). Jede Wissenschaft, auch die Physik, entwirft sich ihren Gegenstand, sie findet ihn nicht einfach vor. Der Gegenstand der Physik ist nicht die unbelebte Natur an sich, sondern ein bestimmter Entwurf davon, der "mathematische Entwurf der Natur", wie Heidegger ihn nennt. Er fährt fort:

Dieser Entwurf endeckt vorgängig ein ständig Vorhandenes (Materie) und öffnet den Horizont für den leitenden Hinblick auf seine quantitativ bestimmbaren konstitutiven Momente (Bewegung, Kraft, Ort und Zeit).

Erst "im Licht" einer dergestalt entworfenen Natur kann so etwas wie eine "Tatsache" gefunden ... werden. (...) Mit der grundbegrifflichen Ausarbeitung des führenden Seinsverständnisses (Vorverständnis; d.Verf.) determinieren sich die Leitfäden der Methoden, die Struktur der Begrifflichkeit, die zugehörige Möglichkeit von Wahrheit und Gewißheit, die Begründungs- und Beweisart, der Modus der Verbindlichkeit und die Art der Mitteilung.
(Heidegger 1977, 479f)

Die "Seinsverfassung" des mathematischen Entwurfs der Natur ist ein geschichtlich gewachsenes Vorurteil, das viel kürzer besteht als die Natur selbst oder die Physik, bzw. die Naturphilosophie. Dieser Entwurf ist eine Grundkomponente des Vorverständnisses eines Physikers seit der Zeit Galileis (siehe dazu die Punkte D.3.3 und D.3.5).

Zur Erhellung des Faktums der Nicht-Unmittelbarkeit der Natur als Gegenstand physikalischer Forschung kann eine Unterscheidung beitragen, die Leont'ev (1971, 15ff) vorschlägt zwischen dem materiellen Objekt ("Objekt") einer Wissenschaft und ihrem formalen Objekt ("Gegenstand"). Das materielle Objekt kann verstanden werden als die Gesamtheit der Einzelobjekte, die vor und unabhängig von der Wissenschaft, dem Forscher und seinem Vorverständnis bestehen. Dies wäre für die Physik die Gesamtheit der unbelebten Gegenstände. (Natürlich ist die Annahme der Existenz von Materie, Raum und Zeit unabhängig vom erkennenden Subjekt selbst ein Vorurteil.)

Das materielle Objekt kann man unter verschiedenen Erkenntniszielen und Fragestellungen, mit verschiedenen Begriffssystemen betrachten. Verschiedene Wissenschaften oder verschiedene Zweige einer Wissenschaft schaffen sich abstrakte Objekte (Physik, Chemie, Geologie, Metereologie usw.). Zu den abstrakten Objekten der klassischen Mechanik zählen Massepunkte, starre Körper, feste Orte, scharfe Impulse, absolute Zeiten, reibungsfreie Bewegungen. Hier wird der mathematische, bzw. der mathematisierbare Charakter eines formalen Objekts deutlich. Als formales Objekt wollen wir die Gesamtheit der abstrakten Objekte bezeichnen. Es ist ein unter bestimmten Gesichtspunkten gestalteter Entwurf des materiellen Objekts, der in die Vorurteilsstruktur für Erkenntnishandlungen in der Wissenschaft eingeht.

Die Dichotomie zwischen der auf erfolgreichen Realisationshandlungen beruhenden Objektivität naturwissenschaftlicher Forschungsergebnisse und ihrer vorurteilsbehafteten Gewinnung erscheint nur auf den ersten Blick als Paradoxon. Wäre die naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung vorurteilsfrei, so müßte sie eine lineare Kette unumstößlicher Ergebnisse liefern. Probleme könnten entweder gar nicht oder nur endgültig, d.h. unwiderlegbar gelöst werden. Die Geschichte der

Physik ist aber reich an Irrwegen und Irrtümern. Das Bestehen der Irrtümer demonstriert, will man nicht der Natur boshafte Selbstverschleierung vorwerfen, die Vorurteilshaftigkeit der Erkenntnis.

Das wesentliche Merkmal naturwissenschaftlicher Erkenntnisprodukte, das sie von geisteswissenschaftlichen unterscheidet, ist ihre Prognosefähigkeit. Die ausgefeilten Methoden der Physik liegen denn auch mehr in der theoretisch-deduktiven und experimentellen Datengewinnung, weniger in der Interpretation von Datensätzen. Naturwissenschaftliche Erkenntnisse sollen "erfolgskontrolliertes Handeln" (Habermas) ermöglichen und sichern. Dies Interesse führt zu einer Form der Erkenntnisprodukte, die die Reproduktion von Ergebnissen und die Deduktion von empirisch kontrollierbarer Vorhersagen erlaubt und die damit die Überprüfbarkeit intersubjektiv und in überschaubaren Zeiträumen sicherstellt. Das formale Objekt ist entsprechend so beschaffen (orts- und zeitunabhängige Realisation im Labor). (Damit ist die Frage der Gültigkeit und Geltung theoretischer Sätze natürlich noch keineswegs abgeschlossen.)

Textinterpretationen oder Geschichtsdeutungen bieten prinzipiell keine Möglichkeit der Überprüfung durch Vorhersage-Tests oder Reproduktionsregeln. Sie sind auf eine Vergangenheit gerichtet, die für die Gegenwart zugänglich gemacht werden soll, ohne verlässliche Schlüsse auf die Zukunft zu gewährleisten.

An den Instanzen der Empirie und der inneren Logik scheitern viele naturwissenschaftliche Erkenntnisprodukte (bzw. werden voreilig zurückgezogen), bevor sie in den Diskurs der Forschungsgemeinschaft eintreten können. Sie geraten in Vergessenheit oder werden erst gar nicht veröffentlicht. Ebenso ergeht es Erkenntnisprodukten, die sich gegen die herrschende Vorurteilsstruktur der Forschungsgemeinschaft nicht durchsetzen können. Auch gültige Produkte, die diese Schwellen überwinden, die aber in der Konkurrenz zu anderen Ergebnissen unterliegen, d.h. keine Geltung erlangen, verfallen diesem Schicksal. Selbst Theorien, die über lange Zeiträume Bestand hatten, dann aber im Laufe der Entwicklung durch andere abgelöst wurden (z.B. die Wärmestofftheorie) werden aus den Lehrbüchern gestrichen oder tauchen nur noch als Anekdoten auf.

So entsteht der Eindruck, als sei für ein bestimmtes Problem keine andere als die aktuell anerkannte Lösung möglich. Diese erhält das Prädikat "denknotwendig". Immer mehr empirische und theoretische Belege bauen die Position der bestehenden Lösung aus. Immer verschiedenere und "elegantere" Herleitungen werden entwickelt. Die Theorie macht sich von ihren ursprünglichen Begründungszusammenhängen und der ihr zugrundeliegenden Vorurteilsstruktur immer unabhängiger. Wenn man über die Theorie verfügt, kann man die Leitern ver-

brennen, auf denen man zu ihr emporgestiegen ist, um ein Bild von Walter Jung zu verwenden. Durch den Prozeß der Verselbständigung und Verselbständlichung der Theorie wird dem Eindruck der Vorurteilsfreiheit naturwissenschaftlicher Erkenntnis Vorschub geleistet. Folgt man diesem Bild bei der Vermittlung der Erkenntnisse an Schüler und unterschlägt die Entstehungsbedingungen der Theorie, so können daraus Verständnisschwierigkeiten resultieren. Darauf hat Pukies (1979) am Beispiel der Fallgesetze und der Thermodynamik aufmerksam gemacht.

Im Zusammenhang mit der spezifischen Form naturwissenschaftlicher Erkenntnisprodukte haben wir von ihrer Funktion der Sicherung "erfolgskontrollierten Handelns" gesprochen. Die Frankfurter Schule, und hier besonders Habermas, hat die ideologische Funktion von Naturwissenschaft und Technik und die spezifisch auf technische Verwertbarkeit ausgerichtete Form naturwissenschaftlichen Wissens herausgearbeitet (Habermas 1979a und 1979b). Die auf Wissenschaft und Technik beruhende Rationalität, bzw. Rationalisierung der Lebensverhältnisse dient danach zur Aufrichtung und Legitimation einer Herrschaft unter dem Namen der "technischen Vernunft". Die bestehenden Produktionsverhältnisse präsentieren sich als die technisch notwendige Organisationsform einer rationalisierten Gesellschaft. Damit geht eine Verschleierung der politischen Herrschaft einher (vgl. Habermas 1979a, 48ff).

Diese ideologische Funktion ist der Naturwissenschaft und Technik nach Habermas nicht nachträglich aufoktroiert, sondern die moderne Naturwissenschaft trägt sie als Wesenszug in sich.

Im Unterschied zu den philosophischen Wissenschaften älteren Typs entfalten sich die modernen Erfahrungswissenschaften seit den Tagen Galileis in einem methodologischen Bezugssystem, das den transzendentalen Gesichtspunkt möglicher technischer Verfügung spiegelt. Die modernen Wissenschaften erzeugen deshalb ein Wissen, das seiner Form (nicht der subjektiven Absicht) nach technisch verwertbares Wissen ist, obwohl sich im allgemeinen die Anwendungschancen erst nachträglich ergaben. (Habermas 1979a, 72f)

Um das Zustandekommen dieses Sachverhalts zu erklären, hat Habermas den Begriff des "erkenntnisleitenden Interesses" geprägt.

Daß kausale Erklärungen (die sich auf empirisch-analytisches Wissen stützen) grundsätzlich in technisch verwertbares Wissen ... umgesetzt werden können, bliebe ein merkwürdiger Zufall, wenn wir diesen Umstand nicht aus jener bedingten Einbettung des theoretischen Wissens in einen universalen Zusammenhang von Interessen erklären und als transzendental notwendig begründen könnten. (Habermas 1979b, 400)

Die erkenntnisleitenden Interessen resultieren aus den objektiven Problemen der

Lebenserhaltung und des kulturellen Zusammenlebens. Sie stehen darüber im Zusammenhang mit der gattungsgeschichtlichen Entwicklung der Menschheit. Mit den erkenntnisleitenden Interessen sind weder die partikularen und kurzfristigen Interessen Einzelner oder von Gruppen gemeint, noch läßt sich das erkenntnisleitende Interesse auf spezifische Probleme eingrenzen.

Interessen nenne ich die Grundorientierungen, die an bestimmten fundamentalen Bedingungen der möglichen Reproduktion und Selbstkonstituierung der Menschengattung, nämlich an Arbeit und Interaktion, haften. (...) Die erkenntnisleitenden Interessen bemessen sich allein an jenen objektiv gestellten Problemen der Lebenserhaltung, welche durch die kulturelle Form der Existenz als solche beantwortet sind. (Habermas 1979b, 242)

Als erkenntnisleitendes Interesse der Geisteswissenschaften formuliert Habermas die Sicherung der intersubjektivität der Verständigung im umgangssprachlichen Kommunizieren und Handeln. Das erkenntnisleitende Interesse der empirisch-analytischen Wissenschaften sei die Erfassung der Wirklichkeit unter dem transzendentalen Gesichtspunkt möglicher technischer Verfügung zur Sicherstellung erfolgskontrollierten instrumental Handelns (vgl. Habermas 1979b, 220f). Mit anderen Worten: Das Interesse der Naturwissenschaften besteht darin, zum Zwecke der Sicherung und Fortentwicklung der menschlichen Existenz Wissen zu erzeugen, mit dessen Hilfe man Naturvorgänge beherrschen, kontrolliert ablaufen und als technische Prozesse nutzbar machen kann. Daraus erklärt sich die spezifische Form naturwissenschaftlichen Wissens. Als Theorien eignen sich hypothetisch-deduktive Satzgebäude, aus denen empirisch gehaltvolle Prognosen abgeleitet und getestet werden können. Die Überprüfung erfolgt im Experiment. Überprüft wird streng genommen der Erfolg der Realisationshandlung, also die Möglichkeit, Randbedingungen zu schaffen, in denen unter einer Gesetzeshypothese erfolgskontrolliert instrumental gehandelt werden kann.

Das erkenntnisleitende Interesse ist dem einzelnen Forscher nicht gegenwärtig. Gleiches gilt für die Forschergemeinschaft, obwohl sie als "Subjekt" des Erkenntnisprozesses Träger dieses Interesses ist und danach verfährt. Das erkenntnisleitende Interesse definiert den Rahmen, in dem Wissenschaft abläuft, d.h. was als mögliche Erkenntnisgegenstände wahrgenommen und was als sinnvoll anzustrebende Resultate angesehen wird. Das erkenntnisleitende Interesse ist dem Erkenntnisprozeß nicht subjektivistisch übergestülpt. Da es die Erfahrungswissenschaften gewissermaßen konstituiert und ihnen Sinn verleiht, wird durch seine Existenz ihre Objektivität nicht beeinträchtigt.

Obwohl auch wir im Konstrukt des Vorverständnisses von Interessen sprechen, die Erkenntnishandlungen anleiten, steht die Habermassche Kategorie des

erkenntnisleitenden Interesses unserem Begriff relativ fern. Die Habermassche Kategorie bezieht sich auf Grundorientierungen der Gattung Menschheit und ist auf themenspezifische Ausformungen hin nicht angelegt. Das erkenntnisleitende Interesse ist zwei Ebenen höher angesiedelt als das Vorverständnis, das der Beschreibung individueller Dispositionen bezüglich begrenzter Erkenntnisbereiche dient. Darüber muß man sich klar sein, wenn man vom "erkenntnisleitenden Interesse" eines Individuums spricht.

Das von Habermas herausgearbeitete Interesse der Naturwissenschaften an der Erzeugung technisch verwertbaren Wissens konkretisiert einen wichtigen Aspekt der generellen These von der Vorurteilsbehaftetheit menschlicher Erkenntnis. Deren Verleugnung hat sowohl Folgen für den Erkenntnisprozeß selbst, als auch für die Vermittlung von Erkenntnissen. Zum ersten Punkt schreibt Jankowitz (1975, 92):

Es ist nicht so, daß es eigens besonderer zusätzlicher Aktivität bedürfe, um eine Vormeinung zu besitzen ... Vielmehr ist die Aktivität der Reflexion nötig, um die vorgefaßte Meinung erst einmal als solche zu entdecken, die den Verstehenshorizont eröffnet und abgrenzt, dadurch aber auch einengt. Die vermeintlich vorurteilsfreie Hingabe an das Geschriebene (wir würden ergänzen: an Beobachtungen, Messungen und Interpretationen; d.Verf.) bedeutet so immer auch Hingabe an die eigenen, unreflektierten Vorurteile.

(Diese Aussagen stehen in engem Zusammenhang mit unseren Ausführungen zur Nicht-Hintergebarkeit des Schülervorverständnisses bei der Ausbildung von Sachstrukturen unter Punkt A.1.2 .)

Zum Ausdruck kommt solch eine der Realität physikalischer Forschung widersprechende Verleugnung der Vorurteile im folgenden Zitat des Erkenntnisphilosophen Bollnow (1975, 155):

(Die alltägliche Arbeit der Physik) besteht zunächst in der Beobachtung und Beschreibung der zu untersuchenden Vorgänge, im Messen mit Hilfe geeigneter Versuchsanordnungen. Man sammelt die Ergebnisse in bestimmten Tabellen ... und sieht, welche Folgerungen sich daraus ziehen lassen. Von bestimmten Hypothesen ist dabei noch gar nicht die Rede, im Gegenteil: vorher aufgestellte Hypothesen über den Ausgang der Versuche würden den unbefangenen Blick für die zu beobachtenden Erscheinungen nur behindern.

Bollnow bestätigt ungewollt die Notwendigkeit des Vorurteilens. Denn wie wird sonst entschieden, welche Vorgänge "zu untersuchen" sind und welche Versuchsanordnungen "geeignet sind"? Wie "sieht" man, "welche Folgerungen sich ziehen lassen"? Wie kann ein Blick "unbefangen" sein, wenn es "zu beobachtende" Erscheinungen gibt?

Die Annahme, es gäbe eine "unbefangene Beobachtung" von Phänomenen oder

Versuchsabläufen leitet über zur Vermittlungsproblematik. Ein Physiklehrer, der davon ausgeht, erwartet in Wirklichkeit, daß die Schüler das sehen müßten, was er sieht und was er ihnen zeigen will, nämlich die "zu beobachtende" Erscheinung. Er mag damit Erfolg haben, wenn das Experiment geschickt darauf hin angelegt ist. Schulgeräte sind meist ganz spezifisch für die Demonstration bestimmter Effekte gebaut. Die Wahrnehmungen werden durch die apparativen Anordnungen gesteuert. Es ist dann eigentlich nicht der Effekt an sich, der "zu den Schülern spricht", sondern seine Präsentation durch die Anordnung der Bauteile, Hinweise des Lehrers und gezielte Fragen. Um so signifikanter für die Vorurteilsbehaftetheit des Lernens und die Bedeutung der Schülervorverständnisse ist es dann, wenn Schüler dennoch etwas anderes sehen oder für wichtig halten als "den" Effekt. Eine Verkenntung der Vorurteile verleitet dazu zu denken, die Schüler hätten nicht genau genug hingesehen oder etwas Falsches gesehen. Die Einsicht in das Fungieren der Vorverständnisse führt demgegenüber dazu, die Schüleraussagen ernstzunehmen und zu versuchen, die ihnen zugrundeliegende generative Struktur zu erschließen, um mit den Schülern in einen echten Dialog eintreten zu können.

In Anlehnung an Jankowitz (1975, 221) kann man sagen: Die "richtige" Frage, die "richtige" Beobachtung ist diejenige, die in einen bestimmten Forschungs- oder Lehrzusammenhang paßt, die also innerhalb einer Vorurteilsgemeinschaft (hier der Physiker oder Physiklehrer) als sinnvolle Frage akzeptiert wird. Das bedeutet nicht, die Fragen wären willkürlich wählbar. Maßgeblich für die Geltung von Vorverständniselementen sind "gute Gründe", wie Bewährung, Perspektive und Interessengemäßheit. Das Postulat der Kausalität z.B. hat die Naturwissenschaft jahrhundertlang erfolgreich angeführt, d.h. zur Gewinnung von Sätzen geführt, die erfolgskontrolliertes Handeln ermöglichen. Carnots Frage nach dem maximalen Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen ("Über die bewegende Kraft des Feuers", 1824) trat in das Bewußtsein der Forschergemeinschaft in einer Phase der sozio-ökonomischen Entwicklung, in der die Dampfmaschine zum wichtigsten Produktionsmittel wurde.

Aber auch hier und jetzt "selbstverständliche", denknotwendig erscheinende Grundannahmen bleiben Vorurteile. Die Geschichte der Physik belegt den langfristigen Wandel von "Grundwahrheiten" (Weltbild, Raum/Zeit, Kausalität). Für jede stabile Vorurteilsgemeinschaft gilt, daß sie sich ihrer Vorurteilsstruktur nicht bewußt ist (Kuhns Phase der paradigmatischen Normalwissenschaft).

Vorurteile erkennt man erst als solche, wenn sie ihre stabilisierende Funktion verloren haben. (...) Vorurteile sind sie also eigentlich und wirklich dann, wenn wir noch nicht von ihnen sprechen.(Jankowitz 1975,90)

Wir erkennen die Vorurteilsstrukturen (Paradigmen) erst dann, wenn die Vorurteilsgemeinschaft (Forschergemeinschaft) in eine Krise gerät. Den Querverbindungen zwischen Vorurteil, Paradigma und Vorverständnis widmen wir uns im nächsten Abschnitt.

Schlußbemerkung

Das philosophische Vorurteil ist auf der hohen Ebene der grundsätzlichen menschlichen Erkenntnisfähigkeit angesiedelt. In den erkenntnisleitenden Interessen finden gattungsgeschichtliche, an objektive Bedürfnisse gebundene Vorurteilsstrukturen ihren Ausdruck. Unser Konstrukt des individuellen Vorverständnisses ist funktional auf einen begrenzten, gerade anstehenden Erkenntnisprozeß bezogen. Man kann das Vorverständnis verstehen als konkrete Ausprägung der prinzipiellen Vorurteilsbehaftetheit menschlichen Erkennens beim Individuum - als Vorurteilsstruktur des Einzelnen. Dazwischen gibt es einen vergleichbaren Begriff auf der Ebene der Forschergemeinschaft: das Paradigma.

Untereinandergestellt in der Reihenfolge zunehmender Spezifität ergibt sich die folgende Hierarchie:

Vorurteilsbehaftetheit
menschlichen Erkennens

erkenntnisleitende Interessen
der Gattung Menschheit

Paradigma der Forschergemeinschaft

Vorverständnis des Individuums

Im folgenden beschäftigen wir uns mit der mittleren Ebene.

A.2.2

Vorverständnis und Paradigma - Querverbindungen zur Wissenschaftstheorie

Die Entwicklung des Konzepts Vorverständnis hat wichtige Impulse erhalten aus der wissenschaftstheoretischen Aufarbeitung des physikalischen Forschungsprozesses (siehe dazu Autorengruppe WIP 1980). Die aus wissenschaftstheoretischen Studien gewonnene Einsicht in die Wichtigkeit der Paradigmen oder Forschungsprogramme für den Erkenntnisfortschritt einer Disziplin und des Vorverständnisses für den individuellen Erkenntnisprozeß von Wissenschaftlern (siehe dazu Fallstudien von Niedderer 1982a und Jaisli 1980) mußte Konsequenzen haben für die Sichtweise der Lernprozesse von Schülern. Das Schülervorverständnis rückte ins Blickfeld fachdidaktischer Reflexion. Von daher sind Querverbindungen zwischen dem Vorverständnis und wissenschaftstheoretischen Konzepten wie dem Paradigma in der Genese des Begriffs angelegt.

Seit den fünfziger Jahren gewinnt in der Methodologie der Naturwissenschaften zunehmend eine Denkrichtung an Boden, die Brown (1977) als "New Philosophy of Science" bezeichnet. Der prominenteste Vertreter dieser Richtung ist Thomas S. Kuhn. Zu nennen sind des weiteren Hanson, Feyerabend, Toulmin und Lakatos. Was rechtfertigt die Subsumtion dieser Wissenschaftstheoretiker? Brown nennt als gemeinsame Überzeugung der Gruppe, Forschung sei der Versuch, die Natur auf der Grundlage eines vorausgesetzten theoretischen Rahmens zu interpretieren. Der Rahmen ("framework") bestimme, welche Probleme einer Lösung zugeführt werden sollten, welche Methoden anzuwenden seien, was wahrgenommen und verfolgt und was als Lösung akzeptiert werde (vgl. Brown 1977, 101). Der so skizzierte Rahmen kommt dem nahe, was Kuhn als Paradigma oder später als "disziplinäre Matrix" bezeichnet hat und zeigt viele Parallelen zu unserem Konstrukt Vorverständnis. Unter verschiedenen Gesichtspunkten und Bezeichnungen findet man tatsächlich bei fast allen "Neuen Philosophen" das Konzept der paradigmageleiteten Forschung.

Aus der Rezeption der Arbeiten Toulmins, Feyerabends, Lakatos' und Kuhns drängt sich mir ein weiteres wesentliches Kennzeichen auf: Die Suche nach einer neuen Rationalität der Wissenschaft. Gegen den logischen Empirismus, die Verbindung aus klassischem Empirismus und symbolischer Logik, wird eingewendet, er gehe an der Realität wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung vollkommen vorbei. Am krassesten formuliert es Toulmin, wenn er gegen die "Logiker" popperscher Provenienz polemisiert:

Was da gesagt wird, mag luzide und gelehrt sein und an Folgerichtigkeit nicht zu wünschen übriglassen, aber irgendwie scheint es danebenzu-

treffen. Es ist nicht faktisch falsch oder auf andere Weise fehlerhaft; es ist einfach irrelevant: Die Fragen, die da so einwandfrei und gründlich diskutiert werden, haben mit Physik nichts zu tun.
(Toulmin 1969, 8)

Rationalität wird von den Neuen Philosophen nicht mehr an deduktive oder induktive Logik gebunden. Zum Ausgangspunkt für die Analyse der Vernünftigkeit wird das Unternehmen Naturwissenschaft selbst genommen, in dem zu bestimmten Zeiten bestimmte Begriffe, Theorien und Fragestellungen zum Tragen kommen und in dem Wissenschaftler in konkreten Situationen Entscheidungen über den Fortgang der Forschungen treffen. Die Ergebnisse der Analyse, die zu einer "Theorie der kollektiven Vernunft" (Toulmin 1978) führen, müssen nach der gemeinsamen Überzeugung der New Philosophie of Science am historischen Unternehmen Wissenschaft geprüft werden. So tritt die Wissenschaftsgeschichte in den Vorder- und die formale Logik in den Hintergrund. Die Wissenschaft schreitet fort, obwohl oder gerade weil die Wissenschaftler ständig gegen die Gesetze der formalen Logik verstoßen. Die tatsächlichen, inhaltlichen Entscheidungen in konkreten Problemsituationen bestimmen die Rationalität der Forschung.

Man erkennt, wie der Akzent sich vom Ergebnischarakter zum Prozeßcharakter der Physik verlagert. Physik ist nicht mehr eine teleologische Abfolge statischer Theorien, sondern ein dynamisch fortschreitendes Unternehmen. Die Trennung zwischen Entwicklung und Überprüfung einer Theorie wird aufgegeben. Hier liegt vielleicht der größte Unterschied zu anderen wissenschaftstheoretischen Ansätzen, von denen die Findung eines Erkenntnisziels (einer Fragestellung) und das Zustandekommen einer Lösungshypothese oft in das Reich spekulativer Metaphysik oder des Psychologismus verwiesen wird.

Wir haben die Tätigkeit des wissenschaftlichen Forschers eingangs dahin charakterisiert, daß er Theorien aufstellt und überprüft. (...) Die erste Hälfte dieser Tätigkeit, das Aufstellen der Theorie, scheint uns einer logischen Analyse weder fähig noch bedürftig zu sein: An der Frage, wie es vor sich geht, daß jemandem etwas einfällt ... hat wohl die empirische Psychologie Interesse, nicht aber die Erkenntnislogik.
(Popper 1969, 6)

Ebenso wie der Neopositivist Popper hält auch der Induktionslogiker Stegmüller es für müßig, über die Motive und Ursachen der Verfolgung bestimmter Fragestellungen und das Zustandekommen von Lösungen zu reflektieren.

Zum Finden von Gesetzen müssen Intuition und Glück des Naturwissenschaftlers zusammenwirken. Die Funktion der induktiven Logik beginnt erst, wenn bereits eine Hypothese vorliegt. (Carnap 1959, 9)

Während die Frage nach dem Wie der Lösung hier lediglich ausgegrenzt wird, gerät die Frage, welches Problem einer Lösung zugeführt wird, nicht einmal ins Blickfeld.

Bei der New Philosophy werden dagegen die konkreten Entscheidungen der Wissenschaftler bei der Theorie(fort-)entwicklung zur Grundlage der Erkenntnislogik. In der Hinwendung zum Erkenntnisprozeß und seinem am Paradigma bzw. am Vorverständnis orientierten Verlauf liegen die Anknüpfungspunkte zwischen Wissenschaftstheorie und Fachdidaktik.

Eine Trennung zwischen Entwurf und Überprüfung einer Theorie hat deshalb keine Grundlage, weil es keine theoriefreien Beobachtungen (Basissätze) gibt und daher kein theoriefreies (wir könnten auch sagen "vorurteilsfreies") Material bereitliegt, gegen das eine Theorie getestet werden könnte.

We shape our percepts out of an already structured but still malleable material. This perceptual material ... will serve to limit the class of possible constructs without dictating a unique percept.
(Brown 1977, 93)

Die Extrempositionen auf der Suche nach einer neuen Rationalität im Rahmen der New Philosophy of Science werden von Lakatos und Feyerabend gehalten. Lakatos teilt in seiner "Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme" (1974a) die Ursachen des Fortschreitens der Wissenschaft in die "interne Geschichte", d.h. wissenschaftsautonome Faktoren, und die "externe Geschichte" ein. Zur zweiten Kategorie zählen alle nicht im Rahmen seiner, Lakatos', Rationalität erklärbaren und daher "empirischen" Faktoren.

Die Adäquanz einer Methodologie wird daran gemessen, inwieweit sie die Geschichte einer Wissenschaft intern rekonstruieren kann. Lakatos grenzt "sozio-psychologische" Faktoren als extern aus der Rationalität aus. Wir werden sehen, daß Kuhn, Toulmin und Feyerabend diese Trennungslinie nicht mehr ziehen.

Die zentrale Annahme in Lakatos' Methodologie besteht darin, daß nicht nur singuläre Tatsachensätze aufgrund von Festlegungen gelten (wie bei Poppers Basissätzen), sondern ganze Theorien. Es wird ein ganzes Forschungsprogramm bewertet mit seinem ...

... konventionell akzeptierten (und daher vorläufig 'unwiderlegbaren') 'harten Kern' und einer 'positiven Heuristik', die Probleme definiert, die Konstruktion eines Gürtels von Hilfhypothesen skizziert, Anomalien voraussieht und sie siegreich in Beispiele verwandelt - alles nach einem vorgefaßten Plan.
(Lakatos 1974b, 280)

Das Forschungsprogramm wird zur Basis für die Auswahl von Fragestellungen, Begriffen, Methoden, Ergebniserwartungen. Es entspricht in unserer Terminologie einem kollektiven Vorverständnis (Lakatos akzeptiert mit Bedenken den Kuhn'schen Begriff "Paradigma"; Lakatos 1974a, 150). In einer solchen Methodologie werden "entscheidende Experimente" zur externen Geschichte gezählt (vgl. Lakatos 1974b, 286).

Nach Lakatos' Programm gibt es andere Kriterien für die Ablösung von Theorien innerhalb von Forschungsprogrammen oder ganzer Programme. Danach wird eine Theorie/ein Forschungsprogramm nur von einer besseren Theorie/einem besseren Programm eliminiert. Dazu ist dann gar keine "Falsifikation" mehr nötig. Besser ist ein konkurrierendes Forschungsprogramm dann, wenn es die Erfolge seines Rivalen erklärt und weitere, neue Entdeckungen verspricht. Lakatos exemplifiziert die Dynamik der Theorieabfolge an Bohrs Programm zur Lichtemission und an Prouts Programm zu den ganzzahligen Atomgewichten reiner Elemente (Lakatos 1974a, 135ff).

Wichtig für unsere Entwicklung des Begriffs Vorverständnis ist Lakatos' an historischen Beispielen belegte These, daß Forschungsprogramme, oder wie wir sagen würden "kollektive Vorverständnisse", mit ihrem harten Kern und ihrer positiven Heuristik eine erkenntnisleitende und -fördernde Funktion haben. Ohne ihre Annahme wären bestimmte Verhaltensweisen, wie die Verdrängung von Anomalien, nicht rational erklärbar. Dies bestärkt uns in der Rückführung von an der Oberfläche unverständlich oder irrational erscheinenden Vorgehensweisen auch von Schülern auf ein verdeckt fungierendes Vorverständnis, das es zu ergründen gilt.

Während Lakatos Wert auf eine normative Methodologie legt, die bei der Rekonstruktion der Wissenschaftsgeschichte als Maßstab für Rationalität dient, und gesellschaftliche sowie sozio-psychologische Faktoren aus der Rationalität ausgrenzt, plädiert auf der anderen Extremposition Feyerabend für den Methoden-nihilismus. Er wirft Lakatos vor, die externen Einflußfaktoren zu vernachlässigen und so die Geschichte der Wissenschaft zu verfälschen (vgl. Feyerabend 1976, 300). Feyerabend billigt Lakatos zu, er habe gegenüber dem Empirismus, dem Logizismus und dem Falsifikationismus einen "gewaltigen Schritt" auf die Realität der Wissenschaft hin getan. Seine Methodologie zeige unter der Oberfläche deutliche Züge des von ihm, Feyerabend, propagierten Anarchismus ("Anarchismus im Schafspelz"; Feyerabend 1976, 277). Ihre äußere Erscheinung sei jedoch die eines Versuchs zur Rettung der Rationalität und als solcher werde sie auch von den Anhängern Lakatos' gelesen.

Nach Feyerabend ist es müßig und gegen den Fortschritt der Wissenschaft, irgendwelche normativen Rationalitätstheorien aufstellen zu wollen. Das einzige Prinzip, das er gelten läßt und das nach seiner Überzeugung die Wissenschaft real leitet, heißt: "Mach was du willst" ("Anything goes"). Die Konsistenzbedingung, nach der neue Hypothesen mit anerkannten Theorien übereinstimmen sollen, sei unvernünftig, weil sie die ältere und nicht die bessere Theorie am Leben erhalte. Würden die Forscher eine Theorie fallenlassen, wenn ihr anerkannte Basissätze widersprechen, bliebe uns keine einzige Theorie, denn:

Wohin man auch blickt, wenn man nur ein wenig Geduld hat und seine Daten ohne Voreingenommenheit auswählt, so findet man, daß Theorien gewisse quantitative Ergebnisse nicht richtig wiedergeben, und daß sie in überraschendem Maße qualitativ unzulänglich sind.
(Feyerabend 1976, 102)

Zum Beleg nennt er u.a. den Widerspruch zwischen Galileis Fallgesetz und Newtons Gravitationstheorie sowie die Unzulänglichkeiten der heliozentrischen Theorie zur Zeit Galileis. Ähnlich wie Lakatos, den Feyerabend nach eigenem Bekunden als einzigen Wissenschaftstheoretiker ernstnehmen kann, meint Feyerabend, Theorien überwinden erst nach einiger Zeit Inkonsistenzen und Anomalien und träten "klar" und "vernünftig" zutage. Das "unvernünftige, unsinnige, unmethodische" Festhalten an einer Theorie in der Zeit der Widersprüche erweise sich als unerläßliche Vorbedingung der Klarheit und des empirischen Erfolgs (vgl. Feyerabend 1976, 42).

Paradigmen, Forschungsprogramme oder individuelle Vorverständnisse spielen in Feyerabends "Methodologie" keine besondere Rolle. Das ist im Rahmen seiner Grundposition des Methodenhedonismus auch nicht naheliegend. Kuhns Paradigma-Theorie lehnt er ab, weil a) die Normalwissenschaft mit ihrem monolithischen Charakter das Aufkommen von konkurrierenden Theorien nicht zulasse, geschweige denn erkläre und b) die mögliche Umkehrung von Kuhns deskriptiver Methodologie in eine normative mit der Forderung nach ungestörter Normalwissenschaft (zum erfolgreichen Rätsellösen) eine gefährliche Behinderung des wissenschaftlichen Fortschritts bedeuten würde (vgl. Feyerabend 1974).

An der Stelle, wo Feyerabend die Wechselwirkung zwischen Theorie und Beobachtung abhandelt, wird deutlich, daß auch er vom Fungieren eines verdeckten Vorverständnisses im Erkenntnisprozeß ausgeht.

Das Material, das ein Wissenschaftler tatsächlich zur Verfügung hat, seine Gesetze, seine experimentellen Ergebnisse, seine mathematischen Methoden, seine erkenntnistheoretischen Vorurteile, seine Einstellungen zu den abwegigen Konsequenzen der Theorie, die er akzeptiert, ist in vielerlei Hinsicht unbestimmt, mehrdeutig und vom historischen Hintergrund nicht ganz getrennt. (Feyerabend 1976, 104)

Einen Großteil der von Feyerabend genannten Faktoren zählen wir zum Vorverständnis eines Forschers (experimentelle und theoretische Kenntnisse, wissenschafts- und erkenntnistheoretische Einstellungen).

Kommen wir zum dritten Vertreter der New Philosophy of Science: Stephen Toulmin. Toulmin bietet keine so griffige Methodologie wie Kuhn oder Lakatos und bekennt gleichzeitig keine so offene Ablehnung jeglicher Methodologie wie Feyerabend. Sein Gegenstand ist in besonderem Maße die Praxis der Wissenschaften. Seine Analysemethoden sind, wie er selbst sagt, stark empirisch, historisch und pragmatisch. Toulmins Grundthese lautet:

In der Wissenschaft wie in der Philosophie war eine ausschließliche Beschäftigung mit der logischen Systematik dem historischen Verständnis wie auch der vernünftigen Kritik äußerst schädlich. Der Mensch zeigt seine Vernünftigkeit nicht dadurch, daß er seine Begriffe und Vorstellungen zu sauberen formalen Strukturen ordnet, sondern dadurch, daß er offenen Sinnes auf neue Situationen reagiert - daß er die Schwächen seiner bisherigen Verfahrensweisen erkennt und über sie hinauskommt.
(Toulmin 1978, 9f)

Toulmin glaubt nicht an die Existenz unveränderlicher Grundsätze des menschlichen Erkennens. Gegenüber Lakatos gibt Toulmin die Trennung zwischen interner und externer Geschichte auf. Er bezieht historisch-gesellschaftliche und individuelle Faktoren in die Beschreibung der Entwicklung einer Disziplin ein. Toulmin nennt vier Bereiche, die für die historische Entwicklung einer Ideenpopulation einer Disziplin zu berücksichtigen seien (vgl. Toulmin 1978, 585f):

1. Die "Erklärungsziele" und die daraus resultierenden Problemstellungen.
2. Die "Zugangskanäle" für wissenschaftliche Neuerungen (Technik, Philosophie usw.).
3. Die Überprüfungskriterien für Neuerungen (z.B. Reife, Protektion).
4. Die historisch-gesellschaftlichen und kulturellen Randbedingungen.

Toulmin trennt von der Entwicklung der Ideenpopulation die "Psychologie der wissenschaftlichen Forschung und Entdeckung" ab. Im Bereich des einzelnen Forschers nennt er als Untersuchungsgegenstände die Wechselwirkung der persönlichen Interessen des Wissenschaftlers und der professionellen Anforderungen der Disziplin (vgl. Toulmin 1978, 588).

Toulmins Methodologie ist, wie oben bereits angedeutet, schwer in kurzer Form darzustellen. Er verzichtet im Einklang mit seiner Grundüberzeugung weitgehend auf plakative Aussagen und wendet sich den vielen einzelnen Einflußgrößen auf die Entwicklung einer Disziplin zu, wobei er Beispiele aus der Physik, Chemie, Jurisprudenz, Evolutionstheorie usw. heranzieht. Der Wert von Toulmins Arbeit liegt eher in den zahlreichen und differenzierten Fragen, die er stellt, als in

seinen Antworten. Erstere kennzeichnen sein Programm und eröffnen dem Leser Gesichtspunkte für eigene Überlegungen.

Greifen wir noch einmal die Aussage Toulmins auf, der Mensch zeige seine Vernünftigkeit dadurch, daß er "offenen Sinnes" auf neue Situationen reagiere. Geht Toulmin damit von einer vorurteilsfreien Erkenntnis aus? Wir glauben das nicht. Toulmin wendet sich gegen die rein logische Analyse und Bewertung des Ideenwandels. Dieser vollziehe sich ohne dogmatisches Festhalten an Regeln jeweils aus guten oder schlechten Gründen in einer konkreten Situation, in der gehandelt werden müsse. Die Bedeutung des Vorverständnisses wird bei der Einordnung des Experiments in den Erkenntnisprozeß deutlich.

Bevor der Wissenschaftler sein Laboratorium überhaupt betritt, muß er schon bestimmte Vorstellungen haben: Über die Sachlagen, deren Untersuchung sich lohnt, über die Versuchsanordnungen, deren Herstellung sich lohnt, und über die Messungen, die es sich zu machen lohnt. (Toulmin 1969, 66f; Hervorhebungen im Original)

Hervorzuheben ist die Einbeziehung von Interessen und Werten ("was sich lohnt") in die Vorstellungen, oder wie wir sagen, in das Vorverständnis des Wissenschaftlers. Für Toulmin ergeben sich diese aus der theoretischen Analyse eines "Problems". Es bleibt dann zu hinterfragen, woher das Problem stammt und festzustellen, daß ein Problem niemals eindeutig die vorzunehmenden Lösungsoperationen vorschreibt (sonst wäre es kein eigentliches Problem). Die Herkunft der Fragen leitet Toulmin aus der Differenz zwischen den Erklärungsidealen einer Disziplin (z.B. Atomphysik: Alle Eigenschaften materieller Dinge in allen Einzelheiten erklären) und ihren gegenwärtigen Möglichkeiten ab. Aus der Differenz würden dann die Probleme aufgegriffen, für die sich Lösungswege abzeichneten.

Die Frage nach der Herkunft der Probleme wird unseres Erachtens damit nur auf die Frage nach der Herkunft des Vertrauens in bestimmte Lösungswege verschoben, denn die "Differenz" ist im allgemeinen beliebig groß, so daß sie keine Eingrenzung des Problembereichs darstellt. (Es gibt auch Gegenbeispiele, in denen die Differenz klein genug war, um bestimmte Fragen zu definieren: z.B. die Suche nach einer Theorie des schwarzen Strahlers zur Vervollkommnung der Elektrodynamik.)

An dieser Stelle kommt der "Weitergabegehalt einer wissenschaftlichen Disziplin" ins Spiel, der besteht aus:

- 1) den gegenwärtigen Erkenntniszielen,
 - 2) den gegenwärtigen Begriffen und Erklärungsverfahren und
 - 3) der summierten Erfahrung aus der Anwendung von 2) zur Erfüllung von 1)
- (vgl. Toulmin 1978, 209).

Besonders herausgestellt werden die Erklärungsverfahren:

Der Kern des Weitergabegehalts - die Hauptsache, die gelernt, geprüft, angewandt, kritisiert und verändert werden soll - besteht in der Palette der wissenschaftlichen Techniken, Verfahren, Fähigkeiten und Darstellungsmethoden, die man anwendet, wenn für Ereignisse und Erscheinungen aus dem Bereich der betreffenden Wissenschaft 'Erklärungen geliefert' werden.

(Toulmin 1978, 190)

Das Vertrauen in die Begehrbarkeit bestimmter Lösungswege, das im Wechselspiel mit den Erklärungsidealen die Grundlage für die Bewertung "lohnender" Vorgehensweisen abgibt, geht damit zurück auf den Weitergabegehalt (das Paradigma, das kollektive Vorverständnis) der Disziplin und dessen Fortentwicklung. Wir sind der Überzeugung, daß die Auswahl aus dem Weitergabegehalt und dessen Umsetzung in praktische Erkenntnistätigkeit dem individuellen Vorverständnis des Wissenschaftlers unterliegen und daß der Auswahl und Umsetzung letztendlich größere Bedeutung für einen Erkenntnisprozeß zukommt als dem übergeordneten Weitergabegehalt an sich.

Derjenige Begriff der New Philosophy of Science, der die engsten Verbindungen zu unserem Konstrukt Vorverständnis aufweist, ist das Paradigma. Grundlegender noch als Lakatos' Forschungsprogramme oder Toulmins Weitergabegehalt einer Disziplin bezeichnet er die Basis, auf der Wissenschaftler als Angehörige einer Forschergemeinschaft Erkenntnisgewinnung betreiben. Verbunden ist der Begriff Paradigma mit der Methodologie von Th. S. Kuhn, dem wohl bekanntesten Vertreter der New Philosophy. Die Rezeption von Kuhns Arbeiten konzentriert sich oft zu stark auf "Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen" (Kuhn 1976; im folgenden "Struktur" genannt). Dadurch entgeht der Wandel, den Kuhn nach der Erstveröffentlichung der "Struktur" im Jahre 1962 vollzogen hat. Wir werden auf diesen Wandel eingehen, da er für eine eindeutige Verwendung des Begriffs Paradigma von Bedeutung ist. Zunächst zur Urfassung seiner Methodologie, wie sie sich uns in der "Struktur" darstellt.

Kuhns Methodologie beruht auf der Annahme, daß sich die Entwicklungsgeschichte einer wissenschaftlichen Disziplin als eine Abfolge zweier Phasentypen rekonstruieren läßt:

1. normalwissenschaftliche Phasen, in denen die Forschung fest auf einem oder mehreren Paradigmen beruhend Rätsel löst, und
2. revolutionäre Phasen, in denen ein älteres Paradigma ganz oder teilweise durch ein nicht mit ihm vereinbares neues ersetzt wird.

Die Annahme steht und fällt mit dem Begriff "Paradigma". Kuhn versteht daran-

ter ...

... allgemein anerkannte wissenschaftliche Leistungen, die für eine gewisse Zeit einer Gemeinschaft von Fachleuten maßgebende Probleme und Lösungen liefern.
(Kuhn 1976, 10)

Das Vorhandensein eines Paradigmas befreit die Forscher von Diskussionen über die konzeptionellen und methodischen Grundlagen ihrer Arbeit. Sie können sich auf festem Boden dem zuwenden, was Kuhn als ihr Hauptbestreben sieht: dem Rätsellösen. Eine Wissenschaft tritt in eine Phase produktiver, konzentrierter Erkenntnisgewinnung erst ein, wenn sich, durch welche Prozesse auch immer, erstmals ein Paradigma etabliert hat. Vorher, in der sogenannten "vorparadigmatischen Phase", erscheinen alle Beobachtungen, die irgendwie zum Gegenstandsbereich der Disziplin gezählt werden können, gleichermaßen relevant zu sein. Es gibt keine Auswahlkriterien für wirklich wichtige und lösbare Probleme, keine Richtlinien für systematische Herangehensweisen.

In der vom Paradigma beherrschten Normalwissenschaft, die Kuhn übrigens in keiner Weise gegenüber der außerordentlichen Wissenschaft in revolutionären Phasen herabsetzt, beruht die kumulative Erkenntnisgewinnung in Experiment und Theorie auf der Behandlung von drei Klassen von Problemen:

- Gegenseitige Anpassung von empirischen Fakten und Theorie.
- Bestimmung von im Lichte des Paradigmas bedeutsam erscheinenden Fakten (genaue Bestimmung von Sternpositionen, Energieniveaus, Dichten o.ä.).
- Neuformulierungen, elegantere, geschlossenere Artikulierung des Paradigmas.

Im Laufe der normalwissenschaftlichen Tätigkeit sammeln sich Widersprüche und Anomalien an, und das um so mehr, je genauer das Paradigma formuliert und je exakter Messungen und Berechnungen werden. Die Normalwissenschaft ist nach Kuhn ein idealer Indikator von Anomalien (vgl. dazu Feyerabends Kritik an der Normalwissenschaft). Zunächst werden diese verdrängt, mit Hoffnung auf spätere Auflösung in die Schublade gelegt oder durch ad hoc Annahmen überdeckt. Das Ziel der Normalwissenschaft ist nicht die progressive Überwindung des Paradigmas, sondern seine Stützung. Dennoch schaufelt die Normalwissenschaft durch die zunehmende Vertiefung und Genauigkeit der Forschungsergebnisse sich und damit dem Paradigma das eigene Grab. Die Anomalien häufen sich, die ad hoc Annahmen wuchern, Zweifel kommen auf: die Disziplin gerät in eine Krise.

Die durch die Krise aufgelockerten Strukturen und die angekratzte Autorität des Paradigmas fördern das Aufkommen neuer Paradigmaanwärter. Es erfolgt eine "wissenschaftliche Revolution". Der Terminus Revolution erscheint ange-

bracht, da für Kuhn ein Paradigmawechsel mit einem grundlegenden Wandel der Weltansicht verbunden ist ("Gestalt-Switch"). Er hält aufeinanderfolgende Paradigmata sogar für "oft inkommensurabel", d.h. für unvergleichbar. Anhänger unterschiedlicher Paradigmen sprächen verschiedene Sprachen und könnten sich daher nicht verständigen. Es gebe keine ausschlaggebenden logischen oder empirischen Gründe für die Wahl eines bestimmten Paradigmas.

Kein bisher durch das historische Studium der wissenschaftlichen Entwicklung aufgedeckter Prozeß hat irgendeine Ähnlichkeit mit der methodologischen Schablone der Falsifikation durch unmittelbaren Vergleich mit der Natur.
(Kuhn 1976, 90)

Ein Paradigma wird erst dann aufgegeben, wenn ein anderes, erfolgversprechenderes bereitsteht (man könnte das als "konstruktives Mißtrauensvotum" bezeichnen). Das neue Paradigma muß einen Teil der Anomalien auflösen, die vom alten Paradigma gelösten Rätsel mitabdecken und vor allem das erfolgreiche Lösen neuer Rätsel versprechen. Das entspricht weitgehend Lakatos' Kriterien für die Ablösung von Forschungsprogrammen. Was den einzelnen Forscher dazu bewegt, ein bestimmtes Paradigma aufzugeben und ein neues zu wählen, kann nach Kuhn nicht rational bestimmt werden. Der Übergang gleiche einer Konversion. Dieser Sachverhalt werde durch nachträgliche Rationalisierung verschleiert (vgl. dazu unsere Ausführungen zur "Denknotwendigkeit" naturwissenschaftlicher Theorien; S. 41ff). Mit der Etablierung des neuen Paradigmas beginnt wieder eine normalwissenschaftliche Phase.

In der bis jetzt beschriebenen Form bietet Kuhns Methodologie ein gut handhabbares Programm, mit dem man die Rekonstruktion der Ideengeschichte einer Disziplin angehen kann. Der große Vorteil dieser ersten Fassung gegenüber späteren Relativierungen besteht darin, daß sie bestimmte Fragen, wie z.B. "Ist die Relativitätstheorie eine Fortentwicklung der klassischen Mechanik, oder handelt es sich um eine völlig andere Theorie mit einer völlig anderen Sichtweise der Welt", aufwirft und andere Probleme, wie die Suche nach rein logischen oder empirischen Gründen für den Übergang von der Wärmestofftheorie zur kinetischen Theorie als Scheinprobleme entlarvt. Das hebt meines Erachtens Nachteile auf, die in der groben Zeichnung und Überpointierung mancher Aspekte liegen, wobei ich an die Annahme einer klaren Trennbarkeit zwischen normalwissenschaftlichen und revolutionären Phasen denke oder an die Inkommensurabilität.

Kuhns Methodologie ist verständlicherweise vielerlei Kritik ausgesetzt. Von der Seite der Logiker wird ihr vorgeworfen, sie sei als eine "Psychologie der Forschung" für eine Theorie des wissenschaftlichen Fortschritts wenig hilfreich.

Dieser Einwand erklärt sich aus den unterschiedlichen Erkenntniszielen von Logikern und "Neuen Philosophen". Die ersten sind an logischen Kriterien für die Überprüfbarkeit von Sätzen und an Abgrenzungskriterien zwischen Naturwissenschaft und Metaphysik interessiert. Dazu leistet Kuhns Arbeit in der Tat keinen Beitrag. Ihr Augenmerk gilt einer neuen Rationalität, die unabhängig ist von formaler Logik und vielleicht gerade deshalb näher dran an realen Erkenntnisprozessen.

Ein weiterer von Popper vorgebrachter Einwand richtet sich gegen die Normalwissenschaft. Diese sei für die Wissenschaft nicht typisch und bringe sie nicht voran.

Es gibt in der Tat eine "Normalwissenschaft", wie sie Kuhn schildert. Es ist die Tätigkeit des nicht-revolutionären oder genauer: des nicht allzu kritischen Professionellen: des angehenden Wissenschaftlers, der das vorherrschende Dogma nicht bezweifeln will.
(Popper 1974, 53)

Popper nimmt für seine "Logik der Forschung" (1969) in Anspruch, sie sei keineswegs normativ, sondern beschreibe die tatsächliche Vorgehensweise der Physik. Kuhn wendet dagegen ein, Popper beschreibe das Unternehmen Wissenschaft so, wie es eigentlich nur auf die Wissenschaft in revolutionären Phasen zuträfe (Kuhn 1974, 6). Diese Aussage erscheint einigermaßen unverständlich, wenn man weiß, daß bei Popper das Kriterium der Falsifikation und damit die Logik über das Schicksal von Theorien entscheidet. Außerdem beharrt Popper auf der Kommensurabilität unterschiedlicher Theorien. Kuhns Aussage ist bezeichnend für die 'Route des Rückzugs' kennzeichnend, die wir im folgenden aufzeichnen werden. Gleichmaßen von den Logikern wie von den Neuen Philosophen werden Kuhns Thesen der Inkommensurabilität, der Dominanz des Paradigmas, der Revolution und des Phasenschemas abgelehnt (vgl. Feyerabend 1974; Toulmin 1978, 119ff).

Die Kritik zeigte bei Kuhn Wirkung. Es folgte das, was ich seine 'Route des Rückzugs' nenne. Sie vollzog sich im wesentlichen auf zwei Gebieten:

1. Relativierung der Revolutionen: Die Bedeutung einer wissenschaftlichen Revolution verschiebt sich von einem absoluten und einschneidenden Wandel der Grundlagen einer Wissenschaft zu 'Mikrorevolutionen', die nur allmählich die Basis verändern und fast schon evolutionäre Züge tragen.
2. Relativierung des Paradigmas: Er wird vom umfassenden Begriff für die Gesamtheit der Grundüberzeugungen einer Disziplin zu einem "Musterbeispiel", einer "Musterlösung", die nur im Verbund mit anderen Paradigmen und Regeln eine Disziplin zusammenhält.

Man erkennt die Parallelität der Relativierungen: Wenn das eine Disziplin beherrschende Paradigma des ersten Typs nicht existiert, kann es keine wirklichen Revolutionen geben. Auf die erste Relativierung werde ich nicht näher eingehen. Die diesbezügliche Rückzugsroute kann man bei Toulmin (1978, 133ff) nachlesen. (Die Erwiderung Kuhns findet sich in Kuhn 1974 , 241ff).

Kommen wir zur Relativierung des Paradigmas. In der Urfassung von Kuhns Methodologie wird das Konstrukt zwar nicht genau definiert, aber aus dem Gebrauch des Wortes und den angeführten Beispielen (Newtonsche Dynamik, korpuskulare Optik, Quantenmechanik) ziehen wir den Schluß, daß damit die Gesamtheit der Regeln, Gesetze, theoretischen und methodischen Überzeugungen, Erfahrungen usw. gemeint ist, die für eine gewisse Zeit die gemeinsame Arbeitsbasis der Mitglieder einer Forschergemeinschaft darstellt. Eine wissenschaftliche Gemeinschaft konstituiert sich geradezu durch die Annahme eines so verstandenen Paradigmas. Geht man von der Existenz wissenschaftlicher Gemeinschaften aus (wofür es gute Gründe gibt: Konferenzen, Fachzeitschriften, wissenschaftliche Gesellschaften), dann ist ihr gemeinsames Merkmal die Ausrichtung auf ein Paradigma, bzw. die Suche danach (z.B. in der Fachdidaktik).

Im Postskriptum zur "Struktur" (geschrieben 1969) beginnt die erste Stufe des Rückzugs: Kuhn bekennt, in seinem Buch "Paradigma" in unterschiedlichen Bedeutungen verwendet zu haben und schlägt eine Differenzierung vor:

Einerseits steht (der Begriff) für die ganze Konstellation von Meinungen, Werten, Methoden usw., die von den Mitgliedern einer gegebenen Gemeinschaft geteilt werden. Andererseits bezeichnet er ein Element in dieser Konstellation, die konkreten Problemlösungen, die, als Vorbilder oder Beispiele gebraucht, explizite Regeln als Basis für die Lösung der übrigen Probleme der "normalen Wissenschaft" ersetzen können. (Kuhn 1976, 186)

Wenn Revolutionen Wandel von Paradigmen sind, bedeutet die Herabstufung des Paradigmas zur Musterlösung die Relativierung der Revolution, denn dann sind Paradigmenwechsel in der Regel nicht mit einem grundsätzlichen Wandel des Weltbilds verbunden. Der Begriff der "Revolution" wirkt dafür übertrieben und aufgesetzt. Kuhn schreibt folgerichtig:

Eine Revolution ist für mich eine Veränderung besonderer Art, die eine besondere Umbildung von Gruppenpositionen beinhaltet. Es muß aber keine große Veränderung sein, noch braucht sie denen revolutionär zu erscheinen, die außerhalb einer vielleicht aus weniger als fünfundzwanzig Personen bestehenden Gemeinschaft stehen. (Kuhn 1976, 192)

Die Theorie verliert an Biß und entzieht sich selbst den Boden. Eine andere Deutung wäre, daß Kuhn den plakativen Terminus "wissenschaftliche Revolution"

aus Effekthascherei gewählt hat, um Aufmerksamkeit zu erregen, und daß er gegen seinen Willen von seinen Lesern ernstgenommen wurde, was ihn dazu zwingt, seine Theorie scheibchenweise auf ihren wahren Kern zu reduzieren. Darauf deuten Kuhns Selbstrechtfertigungsversuche hin, in denen er sich permanent falsch verstanden fühlt (Kuhn 1974 , 223f; Kuhn 1978b, 389)

In seinen "neuen Überlegungen zum Begriff des Paradigma" aus dem Jahre 1974 (Kuhn 1978) werden Paradigmata endgültig auf die Bedeutung von Musterbeispielen zurückgenommen. Für den Zusammenschluß verschiedener solcher Paradigmata mit Regeln und Werten verwendet Kuhn den Begriff "disziplinäre Matrix" (oder "disziplinäres System"). Zunächst scheint eine disziplinäre Matrix einfach die Urbedeutung von Paradigma zu übernehmen und so die Theorie in den alten Stand zu versetzen. Dem ist aber nicht so, denn Revolutionen beschreiben Paradigmenwechsel (von Paradigmen der neuen Art), nicht den Wechsel von disziplinären Matrizen. Kuhn leugnet, jemals an den großen "Makrorevolutionen" besonders interessiert gewesen zu sein (vgl. Kuhn 1974 , 241).

Wir ziehen das Paradigma in dem umfassenden Sinn seiner ersten Version vor und verwenden den jüngeren Terminus "disziplinäre Matrix" synonym. Im Postskriptum von 1969 nennt Kuhn vier Hauptbestandteile einer disziplinären Matrix (vgl. Kuhn 1976, 194ff):

1. Symbolische Verallgemeinerungen: Formeln ($I=U/R$, $actio = reactio$) in der Bedeutung von Gesetzen oder Definitionen, die von allen Mitgliedern einer Gemeinschaft problemlos verwendet werden.
2. Metaphysische Paradigmata: Grundüberzeugungen wie "Wärme ist ein unwägbares Fluidum" oder "Alle Erscheinungen gehen auf die instantane Wechselwirkung materieller Körper zurück": Vertrauen in bestimmte Modelle.
3. Werte: - bezüglich Voraussagen: Genauigkeit, Vorzug quantitativer Voraussagen gegenüber qualitativen usw.
- Beurteilungskriterien für Theorien: Widerspruchsfreiheit, Einfachheit, Rätselvorrat usw.
- andere: z.B. "Wissenschaft soll gesellschaftlich nützlich sein".
4. Paradigmata in der Bedeutung von Musterbeispielen für Problemlösungen theoretischer oder technischer Art: das konische Pendel, die Keplerschen Planetenbahnen, die Wheatstonesche Brücke.

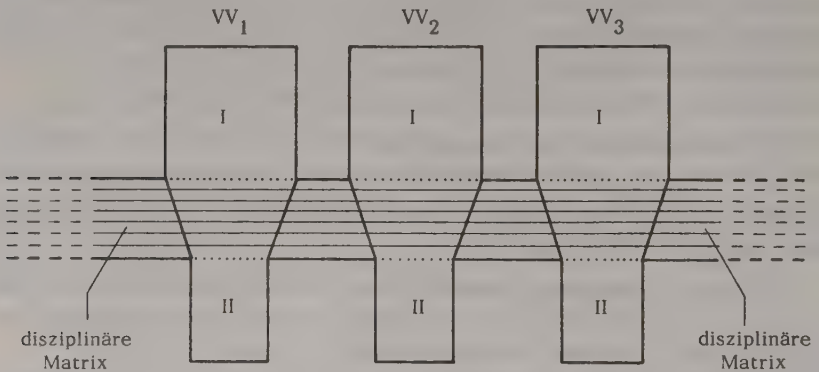
Wir wollen nicht verschweigen, daß Kuhn den "Inspirationsquellen des Einzelnen" keine Bedeutung für die Methodologie zumißt (Kuhn 1978a, 382). Er grenzt damit individuelle Vorverständnisse oder, wie wir sie nennen können, "individuelle Matrizen" aus der Theorie aus. Sein Interesse gilt den "Gemeinsamkeiten der

anerkannten Vertreter einer Wissenschaft". Auch Toulmin stellt die "kollektiven Professionsbelange" über den einzelnen Forscher:

Die theoretischen Ziele und Schwierigkeiten einer Disziplin stehen im Mittelpunkt der gemeinsamen wissenschaftlichen Anstrengungen der Fachvertreter; und diese Ziele filtern dann aus deren persönlichen Interessen diejenigen theoretischen Probleme heraus, die für die kollektive Entwicklung der Wissenschaft von Bedeutung sind.
(Toulmin 1978, 342)

Der Zusammenhang von individuellen Vorverständnissen und einer disziplinären Matrix (Toulmin: Weitergabegerüst) läßt sich in zwei Weisen verstehen und darstellen:

1. Die disziplinäre Matrix als Filter für individuelle Vorverständnisse



VV_i : Vorverständnis des i-ten Mitglieds einer Forschergemeinschaft

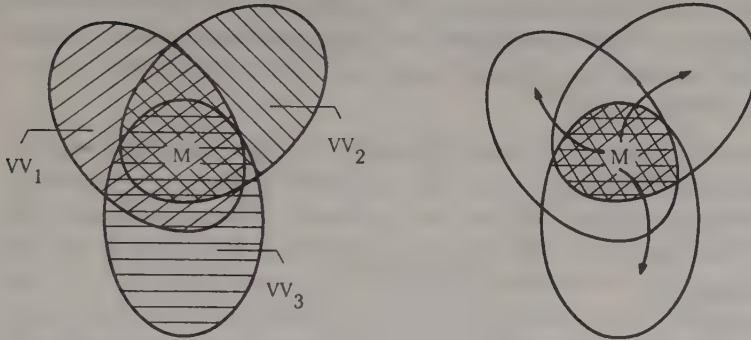
Bereich I : individuelles Vorverständnis in seiner Gesamtheit

Bereich II: im Rahmen der Forschergemeinschaft zum Tragen kommender Teil

Abb. A4: Disziplinäre Matrix und Vorverständnis (Modell 1)

Modell 1 geht vom Bestehen einer (wie auch immer zustande gekommenen) Matrix aus, die die individuellen Vorverständnisse filtert. Das Modell trägt der Tatsache Rechnung, daß die Mitglieder einer wissenschaftlichen Gemeinschaft auf der Basis eines Paradigmas über lohnenswerte und erfolgversprechende Forschungsansätze diskutieren (in Zeitschriften, auf Kongressen). Neuaufzunehmende Mitglieder durchlaufen eine am Paradigma orientierte Ausbildung und Auslese. Das Modell erklärt nicht das Zustandekommen und die Veränderung von Matrizen. Dafür erscheint ein zweites Modell geeigneter.

2. Die disziplinäre Matrix als Schnittmenge der individuellen Vorverständnisse



VV_i : Vorverständnis des i -ten Mitglieds einer Forschergemeinschaft

M : disziplinäre Matrix der Forschergemeinschaft

Abb. A5: Disziplinäre Matrix und Vorverständnis (Modell 2)

In Modell 2 sind die individuellen Vorverständnisse gegeben. Aus ihnen formt sich die disziplinäre Matrix. Das Modell ist geeignet für die Erklärung evolutionären Wandels durch Änderung einzelner Vorverständnisse. Wissenschaftliche Revolutionen können durch krisenhafte Erschütterungen von zentralen Elementen der Schnittmenge erklärt werden, die eine Umbildung und Neuzusammenschließung der verschiedenen individuellen Vorverständnisse nach sich ziehen. Man kann Modell 2 für die Erklärung der Beständigkeit disziplinärer Matrizen über lange Zeiträume (z.B. der Newtonschen Dynamik) ausbauen, indem man es durch eine Rückwirkung der Matrix auf die individuellen Vorverständnisse stabilisiert (Abb. A5).

Wertung: Vorverständnis und Paradigma

Wenn wir das Paradigma als den zentralen Begriff der New Philosophy of Science verstehen (vergleichbar bei Toulmin: Ideenpopulation, Weitergabegehalt einer Disziplin; Lakatos: Forschungsprogramm), dann lautet die Grundthese dieser

wissenschaftstheoretischen Schule:

Die Gewinnung von Erkenntnissen vollzieht sich in einer wissenschaftlichen Gemeinschaft auf der Grundlage eines teilweise explizit formulierten (Begriffe, Regeln, Gesetze, experimentelle und theoretische Methoden), teilweise unterschwellig fungierenden (metaphysische Überzeugungen, Werte, erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Positionen) Rahmens: dem Paradigma. Das Paradigma leitet Zielsetzungen und Erkenntnishandlungen der Forschungsgemeinschaft an.

Das Paradigma steuert den Erkenntnisfortschritt also auf der Ebene der Forschungsgemeinschaft. Ein vergleichbares, auf der Ebene des einzelnen Wissenschaftlers angesiedeltes Konzept, das die ein Individuum anleitenden Faktoren zum Ausdruck bringt, liefert die New Philosophy of Science nicht. Die Existenz von "Inspirationsquellen den Einzelnen" (Kuhn) wird zwar nicht bezweifelt; für die Methodologie des wissenschaftlichen Forschungsprozesses finden sie jedoch keine Beachtung. Paradigmata werden aus der Entwicklungsgeschichte von Disziplinen erschlossen. Einzelne Forscher spielen nur insofern eine Rolle, als sie Protagonisten eines Forschungsprogramms sein können (z.B. Bohr bei Lakatos 1974a, 137ff).

Unser Konstrukt des individuellen Vorverständnisses ist die Fortschreibung des Paradigmas auf den individuellen Erkenntnisprozeß. Wir sagen:

Ebenso wie der Erkenntnisfortschritt einer Disziplin durch ein Paradigma angeleitet wird, verläuft der Erkenntnisgang des Einzelnen im Rahmen seines individuellen Vorverständnisses. Ein Individuum wird bei der Auswahl von anzustrebenden Erkenntniszielen, bei Erkenntnishandlungen und bei der Formulierung der Ergebnisse von seinem Vorverständnis angeleitet.

Das Vorverständnis eines Forschers ist starken Einflüssen des Paradigmas der wissenschaftlichen Gemeinschaft unterworfen, der er sich zugehörig fühlt. Daneben gibt es eine Reihe anderer Bedingungsfaktoren. Das Umfeld, in dem sich das Vorverständnis eines Wissenschaftlers bildet, kann man in drei Bereiche einteilen:

- a) den wissenschaftssoziologischen Bereich (Forschergemeinschaft)
- b) den individuellen Bereich (Lebensweg des Forschers)
- c) den historisch-gesellschaftlichen Bereich.

Wir haben die Bedingungsfaktoren der Herausbildung von Vorverständnissen an Beispielen aus der Physik in Baumgart (1982) erläutert (S. 8-11). Begnügen wir uns an dieser Stelle mit einer Übersichtsgraphik:

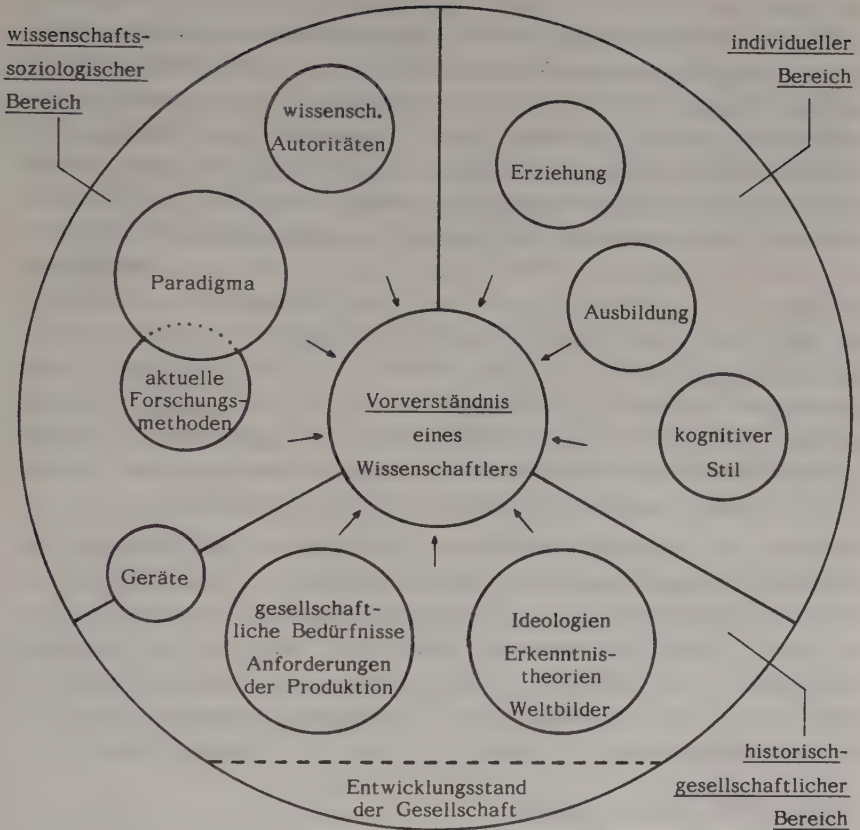


Abb. A6: Einflußfaktoren auf das Vorverständnis eines Wissenschaftlers

Für den Erkenntnisfortschritt wissenschaftlicher Disziplinen mag es vorrangig auf Paradigmen ankommen (daraus begründet sich die Konzentration der Wissenschaftstheorie auf Paradigmen/Forschungsprogramme) - für den einzelnen Erkenntnisprozeß ist das fungierende individuelle Vorverständnis entscheidend, in das ein Paradigma nur als ein, wenn auch wichtiger, Bedingungsfaktor eingeht. Diese Aussage gilt für Forscher wie für Schüler. Einen für Schüler ähnlich bedeutsamen Faktor wie das Forschungsprogramm für den Wissenschaftler sieht man zunächst nicht. Es gibt jedoch Hinweise darauf, daß der Zugang zu Phänomenen der natürlichen und technischen Umwelt beim Schüler wesentlich geprägt

wird durch ein aus der Umgangssprache entnommenes System von "Alltagstheorien", die die Verständigung im Alltagsdiskurs sichern. Die Vergleichbarkeit wissenschaftlicher Paradigmata mit Alltagsvorstellungen ist natürlich nur bedingt gegeben: Alltagstheorien haben viel enger begrenzte Gegenstandsbereiche als Paradigmen, sie sind für Schüler nicht so verbindlich wie Paradigmen für Forscher, unterschiedliche Alltagstheorien zum gleichen Gegenstandsbereich können problemlos nebeneinander bestehen, Alltagstheorien lassen sich nur schwer kontextfrei, d.h. ohne Bezug auf konkrete Verwendungssituationen beschreiben usw. Dennoch hat Clement (1982) das Umdenken von den Alltagstheorien der Mechanik zum Newtonschen System mit einem Paradigmawechsel verglichen. Wir halten das für gerechtfertigt, da bei einem solchen Umdenken eine grundlegend neue Sichtweise der Phänomene erworben wird ("Gestalt-Switch"). Einige grundlegende Merkmale des Umdenkens, auf die wir noch genauer eingehen werden, lassen sich wie folgt umreißen: Denken in Eigenschaften → Denken in Relationen, Geben-Nehmen-Schemata → Austausch-schemata, lineares Denken → Systemdenken, Ursache-Wirkungs-Denken → Wechselwirkungsdenken.

Funktional und strukturell bestehen enge Beziehungen zwischen Paradigma und Vorverständnis. Beide fungieren als generative Struktur für Fragestellungen und Handlungsverläufe. Beide filtern aus der Fülle zugänglicher Informationen diejenigen heraus, die als problemrelevant gelten sollen. Man kann das individuelle Vorverständnis kategorial ähnlich ordnen, wie Kuhn die disziplinäre Matrix strukturiert hat. All das rechtfertigt es, vom Vorverständnis als dem Paradigma auf der Ebene des Individuums zu sprechen, oder von der individuellen Matrix.

Appendix: Paradigma und Vorurteil

Zwischen dem Paradigma einer Forschergemeinschaft und dem philosophischen Vorurteil bestehen Querverbindungen hinsichtlich ihrer Funktionen. Zum Vorurteil schreibt Jankowitz (1975, 15):

Vorurteile erfüllen ihre lebenserhaltende Funktion, indem sie Gesellschaften stabilisieren. Stabilität in einer Gemeinschaft ist dann erreicht, wenn alle eine bestimmte Überzeugung akzeptieren, die sich von selbst versteht. Die Frage nach dem Warum kommt nicht auf.

Das erinnert stark an die Funktion von Paradigmen in normalwissenschaftlichen Phasen. Man kann Jankowitz' Aussage sinngemäß auf disziplinäre Matrizen übertragen:

Paradigmen erfüllen ihre erkenntnisfördernde Funktion, indem sie wissenschaftliche Gemeinschaften stabilisieren. Stabile normalwissenschaftliche Phasen sind dann erreicht, wenn alle Mitglieder eine bestimmte Basis der

Forschung akzeptieren. Diese gilt dann als selbstverständlich.

Weitere Gemeinsamkeiten liegen in der Erkennbarkeit, bzw. Nichterkennbarkeit von Vorurteilen/Paradigmen. Ein Stabilisierungskern wird erst dann als Vorurteil wahrgenommen, wenn er seine Herrschaft verloren hat, also bereits andere Vorurteile die Ordnung stabilisieren. Die alten Vorurteile erscheinen im Rückblick negativ, falsch, fehlerhaft. Auch Paradigmen werden in der Normalwissenschaft kaum bewußt reflektiert. Sie gelten als evident oder denknotwendig. Erst in der Krise und von der Warte eines neues Paradigmas aus entschleiern sich ihre Gesetzmäßigkeiten.

A.2.3

Vorverständnis und Präkonzept - zentrale Konzepte der Fachdidaktik

Die Erforschung von Schülervorstellungen hat sich zu einem Arbeitsschwerpunkt aktueller Physikdidaktik entwickelt. Davon zeugt u.a. das Seminar "Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht", das 1982 vom IPN in Kiel veranstaltet wurde. Es werden Arbeiten wiederaufgenommen und in neuer Form fortgeführt, deren Vorläufer in den fünfziger und sechziger Jahren liegen (Zietz 1963; Wagenschein 1973).

Nach einer Phase, in der Sachstrukturanalyse, Gesellschaftsbezug und Medieneinsatz im Vordergrund des Interesses standen, wird der Lernende als entscheidende Determinante des Lernprozesses erkannt. Aufschnaiter (1982) spricht vom "Kind-Paradigma" fachdidaktischer Forschung. Entsprechende Forschungsprogramme seien gekennzeichnet durch die Analyse des Denkens und Handelns einzelner Schüler in konkreten Lernumwelten.

Es gibt in Forschungsprogrammen unter dem Kind-Paradigma Begriffe, die unserem Konzept Vorverständnis nahestehen. Schenk (1983, 2) definiert "Alltagstheorien" in enger Verwandtschaft:

Alltagstheorien sind generative Strukturen, die das Beobachten, Erklären und Handeln physikalisch ungeschulter Erwachsener in alltäglichen Situationen anleiten.

Viennot (1979, 205) spricht von einem "Erklärungsschema intuitiver Physik", das, ohne auf der Schule vermittelt worden zu sein, unser Denken beeinflusst. Trowbridge/Mc Dermott verwenden den Terminus "Protokonzept":

Prior to instruction the student typically has a repertoire of procedures, vocabulary, associations, and analogies for interpreting motion in the real world. These, taken together, may be considered as a set of protoconcepts which antedate understanding of the concepts of kinematics.
(Trowbridge 1980, 1027)

Im englischen Sprachraum existieren eine Reihe weiterer vergleichbarer Begriffe: "misconceptions" (Arons), "preconceptions" (Clement), "prior knowledge" (Sutton), "prior conception" (Gilbert). Wir wollen uns in diesem Abschnitt näher mit zwei Forschungsprogrammen beschäftigen, deren zentrale Termini lauten: "Präkonzept" (Walter Jung) und "typisches Vorverständnis" (Bruno Redeker). Jung setzt bei den Lernschwierigkeiten vieler Schüler im Physikunterricht an, die er auf unkontrollierte Wechselwirkungen zwischen Schülervorstellungen und Lernangebot zurückführt. Redeker stellt seine Forschungen auf die philosophische Grundlage der Phänomenologie. Er reflektiert über die grundsätzlichen Unterschiede lebens-

weltlicher und wissenschaftlicher Begriffsbildung und erklärt die Übernahme des idealgesetzlichen "mathematischen Entwurfs der Natur" zur notwendigen Voraussetzung für das Lernen von Physik.

Beginnen wir bei Walter Jung. Ausgangspunkt seiner Arbeiten über Schülervorstellungen/Präkonzepte ist die Hypothese, ...

... daß Lernschwierigkeiten durch nicht antizipierte Wechselwirkungen zwischen vorhandenen Vorstellungen, oder Präkonzepten, und dem angebotenen Lehrmaterial entstehen.
(Jung 1981a, 19)

Jung bevorzugt den Terminus "Präkonzept", um den funktionalen Charakter zu betonen. Die Vorsilbe "Prä" ist so zu verstehen wie das "Vor" in Vorverständnis, nämlich zur Kennzeichnung eines vor dem Erkenntnisprozeß vorhandenen und diesen anleitenden Faktors, nicht einer zeitlichen Vorstufe von einem "richtigen" Konzept. Funktional sind Präkonzepte und Vorverständnisse identisch:

Vorstellungen bestimmen die Deutung neuer Erfahrung durch Selektion und Transformation der Daten und sie bestimmen die Produktion neuer Erfahrung durch Steuerung von Erwartungen, die aus den Vorstellungen folgen.
(Jung 1981b, 9)

Auf diesen Thesen basiert ein Forschungsprogramm, das sich grob in zwei Phasen einteilen läßt:

1. Ermittlung von Präkonzepten zu den wichtigsten Begriffen eines ausgewählten Themenbereichs der Physik mittels schriftlicher Befragungen (Denkaufgaben), Interviews und Assoziationstests.
2. Konstruktion eines Lehrangebots für den Themenbereich derart, daß
 - a) ermittelte Anknüpfungsmöglichkeiten an Schülervorstellungen für den Aufbau von wissenschaftlichen Vorstellungen genutzt werden, z.B. durch Angebote für die Definition physikalischer Begriffe, die den Schülervorstellungen entgegenkommen ("lokale Konsequenzen"), oder
 - b) die Sachstruktur geändert wird, um die Aktivierung falscher Vorstellungen zu vermeiden, bzw. um besonders problematische Begriffe aus dem Lehrgang zu streichen ("globale Konsequenzen").

Zur Mechanik liegt ein entsprechender Forschungsbericht vor (Jung 1981a).

Was versteht Jung nun im einzelnen unter Präkonzepten? In einem Aufsatz von 1978 finden wir eine Stellungnahme zur wohlbekannten These des Lerntheoretikers Ausubel: "The most important single factor influencing learning is what the learner already knows". Jung diskutiert den Terminus "knows". Er zählt dazu:

- das, was im Sinne von begründeter und verarbeiteter Information gespeichert ist,
- bloß übernommene Informationen
- informationsverarbeitende Prozesse wie Ausfiltern, Superieren, Subsumieren,
- Das kategoriale System, mit dem die Welt habituell betrachtet wird.

(vgl. Jung 1978, 125)

Der konzeptuelle Rahmen werde zum Großteil aus dem Alltagsdiskurs gelernt. Er sei z.T. mit Vorstellungen ausgefüllt, die ein Hindernis für das Lernen von Physik darstellten. Die begriffliche Organisation beeinflusse als ein relativ stabiler Rahmen zur Ordnung neuer Erfahrungen auch die kognitiven Prozesse wesentlich. Jung sieht in der konzeptuellen Organisation zwei deutlich unterscheidbare Ebenen:

- 1) "relativ spezifische Vorstellungen", "begriffliche Organisatoren auf niedriger Ebene", "Vor-Begriffe", z.B. Alltagsvorstellungen von "Körper": menschlich, erotisch besetzt; oder von "Kraft": Potenz, Kraft haben.
- 2) die "konzeptuelle Organisation auf kategorialer Ebene", z.B. die alltagsweltlichen Denkschemata "Substanz-Akzidenz" oder "Substanz-Qualität".

Jung will in seinen Arbeiten beide Ebenen berücksichtigen. Eine Beschränkung auf Ebene 1 hält er für unzweckmäßig. Er geht davon aus, daß von der kategorialen Ebene aus die spezifischen Vorstellungen am wirksamsten aufgebrochen werden können.

Der Begriff Präkonzept/Vorstellung wird an verschiedenen Stellen umschrieben, exemplifiziert, abgegrenzt.

"Vorstellung" ist kein Terminus der Wissenschaft. Was damit gemeint ist, läßt sich im Rahmen verschiedener Theorien verschieden präzisieren, z.B. als "Schema", "script", "frame", "conceptual framework". (Jung in Duit 1981, VIII)

Mir geht es um die Abgrenzung von "Vorstellungen", die nicht verbalisiert und bewußt akzeptiert werden können. Gleich ob es solche gibt oder nicht: Hier geht es um Vorstellungen, die verbalisierbar sind und deren sich der Lernende bewußt werden kann. (Jung 1978, 129)

Es geht um Vorstellungen im Sinne verbalisierbarer Äußerungsdispositionen ... Diese Vorstellungen sollen konstant und typisch sein, z.B. für eine Altersgruppe. (Jung 1978, 131)

Eine über diese Umschreibungen hinausgehende strenge Definition von "Vorstellung" ist vielleicht gar nicht sinnvoll. Der Bereich der Schülervorstellungen ist so facettenreich, daß eine Festlegung im Sinne einer psychologischen Theorie, z.B. der Theorie der semantischen Netzwerke, bei der konkreten Darstellung der Vorstellungsinhalte eher hinderlich wäre. Wir können davon ausgehen, daß

"Präkonzept" bei Jung sowohl spezifische Vorstellungen als auch Rahmenvorstellungen oder Kategoriensysteme abdeckt.

Wenden wir uns einigen von Jungs Arbeiten zu und versuchen, den Schwerpunkt seines Forschungsinteresses herauszufinden. Die Durchsicht zeigt, daß, zumindest vom Umfang her, Vorstellungen über physikalische Begriffe an ersten Stelle stehen (Jung 1981a, 1981d). Ausgewählte Begriffe sind Trägheit, Kraft, Stoß, Sehen, Licht, Farbe, Dunkelheit, Spiegelung usw. Als Ergebnisbeispiel seien Vorstellungen zu "Trägheit" angeführt (vgl. Jung 1981a, 29ff):

- anthropozentrisches Verständnis: "träge sein"
- Langsamkeit, Bewegungslosigkeit
- Verkopplung mit Reibungsphänomenen
- Trägheit ist eine durch Kraft zu überwindende Schwelle
- Trägheit ist eine Gegenkraft

Neben den kognitiven und eingeschränkt den affektiven spezifischen Begriffsvorstellungen widmet Jung sich den übergeordneten Denkkategorien, hier besonders dem physikalischen Denken in Relationen und dem ihm entgegenstehenden Alltagsdenken in Eigenschaften (z.B. beim Begriff "Gewicht"). Schülerinteressen, ausgedrückt in schülereigenen Fragerichtungen, werden nur am Rande erwähnt, so etwa ganz am Schluß einer Veröffentlichung über Schülervorstellungen in Optik (Jung 1981d, 150):

Ich will einen abschließenden Eindruck zufügen ...: Das Interesse der meisten Kinder, die mit Optik konfrontiert werden, richtet sich im Rahmen der naiven Rahmenvorstellungen, jedenfalls von Mischvorstellungen, auf das Phänomen Farbe. Ich konnte darüber hier aus Zeitgründen wenig sagen.

Hier liegt ein Unterschied zu unseren Vorverständniserhebungen. Wir sehen eigene Fragestellungen von Schülern als den Ausfluß ihrer Interessen an, denen wir als Vorverständniskomponenten besondere Bedeutung einräumen. Des weiteren halten wir allgemeine Vorstellungen (Rahmenvorstellungen) über Gegenstände, Ziele und Vorgehensweisen der Physik für wichtige Determinanten des Schülerverhaltens im Unterricht. Jung geht darauf wenig ein. Seine Begründung für die Konzentration der Präkonzepte auf Begriffe liegt in der Annahme, den Begriffen komme die erstrangige Bedeutung für das Schülerverhalten zu - auch bei der Auswahl von Fragestellungen. Dazu tritt eine gewisse Skepsis, ob man valide Daten über Schülerinteressen überhaupt erheben könne. Zum Verständnis muß man zwei Grundannahmen Jungscher Didaktik berücksichtigen, die sich uns so darstellen:

1. Orientiere die Inhalte des Physikunterrichts an den zentralen Konzepten der

Physik. Sie bilden den Rahmen, der die Einordnung von Einzelerkenntnissen und die Verfolgung neuer Entwicklungslinien ermöglicht.

Die Vermittlung grundlegender Konzepte oder "Ideen" (Wechselwirkungsprinzip, Erhaltungssätze, Bezugssysteme) und des kategorialen Rahmens der Physik (Körper, Prozeß, Zustand, Relation usw.) sind Hauptanliegen Jungs. Er hält den Erwerb der "Fähigkeit zur habituellen Verwendung wissenschaftlicher Deutungsmuster" für die wichtigste Rechtfertigung des Physikunterrichts (vgl. Jung 1979c, 15). Hier liegen für ihn gleichzeitig die größten Schwierigkeiten des Lehrens von Physik, da die Schüler aus dem Alltagsdenken ein ganz anderes kategoriales System gewöhnt seien.

2. Phänomene, Ideen und physikalische Denkrahmen bilden das Überdauernde der Physik. Aktuelle Anwendungen und Theorien sind vergänglich.

Jung wendet sich gegen das "modische Prinzip, ... Unterricht an den aktuellen Bedürfnissen und Problemen der Gesellschaft und/oder der Schüler, bzw. Menschen zu orientieren" (Jung 1980a, 474). Die aktuellen Bedürfnisse von heute seien morgen die alten Hüte von gestern. Er hält es für falsch, unmittelbare Schülerinteressen, die niemand eigentlich kenne, gegen das Anbieten "vorgeblich abstrakter Wissensbestände" auszuspielen (vgl. Jung 1981a, II). Ziel des Physikunterrichts müsse die Vermittlung eines allgemeinen Verständnishorizonts für neuzeitliche Physik sein (vgl. Jung 1979, 205).

Bei Berücksichtigung dieser Grundüberzeugungen erscheinen die Schwerpunktsetzungen Jungscher Präkonzept-Forschung konsequent. Von seinem Team liegen umfangreiche Berichte vor (speziell zur Mechanik), auf die wir unter Punkt C.2.12 eingehen. Unsere eigenen Arbeiten bauen in vielen Punkten auf den Forschungen Jungs zur Mechanik auf.

Zum Begriff Vorverständnis hat Jung in einem Bericht über einen Workshop der Tagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik 1981 Stellung genommen (Jung 1982a, 55). Er unterscheidet darin drei mögliche Bedeutungen:

1. "Vor" zeitlich verstanden. Dies sei die verbreitetste, aber auch die trivialste Auffassung
2. "Vor" logisch verstanden im Sinne von "Vortheorie" oder begrifflicher Subsumtion
3. "Vor" epistemologisch verstanden: das Vorverständnis als begrifflicher Horizont, der bestimmt, was vorstellbar ist. Im Gegensatz zu einzelnen Vorstellungen sei der Horizont selbst nicht so veränderbar.

Unserem Konzept entsprechen die Bedeutungen 2 und 3, wobei wir die epistemo-

logische Komponente (vgl. Punkt A.2.1 "Vorverständnis und Vorurteil") auf bestimmte Themen- oder Phänomenbereiche beziehen, nicht auf Wahrnehmung, Erkenntnisfähigkeit oder Weltsicht allgemein. Das Vorverständnis bestimmt, welchen Phänomen/Problemen Aufmerksamkeit geschenkt und mit welchen Begriffen, Theorien und unter welchen Vorgehensweisen sie angegangen werden.

Eine stark epistemologisch ausgerichtete Bedeutung hat der Begriff Vorverständnis wie Redeker ihn verwendet. Redeker operiert in seiner Dissertation von 1978 mit einem dem unseren sehr ähnlichen Terminus: dem "typischen Vorverständnis" (von "Strom", "Licht", "Druck"). Die inhaltliche Kongruenz ist jedoch weniger stark als es der Terminus vermuten läßt, wenn auch die Grundannahmen übereinstimmen. Redekers Zugang ist ein philosophischer. Aus den Prinzipien der von Husserl begründeten Phänomenologie leitet er ab:

Jede aktuelle Erfahrung eines Einzelnen ... geschieht aufgrund der in ihrer Kenntnisnahme erfolgenden Antizipation des Allgemeinen, die den zusammenhängenden Gang von Einzelerfahrungen leitet. (Redeker 1978, 58)

Was also im Fortgang der Erfahrung zur weiteren Kenntnis kommt, ist darum niemals im Sinne des Wortes zunächst Unbekanntes, sondern hat aufgrund des inhaltlich unbestimmten oder unvollkommen bestimmten "Vorwissens", bzw. Horizontes, den Charakter des Vorbekannten, bzw. logisch Erwarteten. (Redeker 1978, 59)

Darauf baut Redekers Definition von "typisches Vorverständnis" auf:

(Das Vorverständnis ist) ein die Kenntnisse und Handlungen, das Auffassen und Äußern usw. ... vorgängig leitendes und in der Typik prägendes Wissen.
(Redeker 1981, 109)

Redeker nimmt keine Subkategorisierungen vor (etwa in Begriffs- und Rahmenvorstellungen oder Interessen). Er legt Wert auf eine Abgrenzung von den "Vorkenntnissen" der Schüler als verbalisierbarem, vorzeigbarem Wissen.

Im Unterschied zu allen Äußerungen, Kenntnissen, vorläufigen oder unvollständigen Kenntnissen und Vorstellungen, im Unterschied zu allem gewußten, thetischen Wissen ... geht es mir um die Interpretation jenes Wissens, das Erwartungen, Äußerungen, Verhalten, Wahrnehmen usw. gleichsam verdeckt leitet und bestimmt, um die Interpretation unthematisch fungierender Vorverständnisse.
(Redeker 1981, 110)

Eine Analyse der Beispiele, die Redeker als typische Vorverständnisse anführt, wird den Begriff konkretisieren. Gleichzeitig wollen wir die Beispiele in unser Konzept von Vorverständnis einordnen. Einem naheliegenden Mißverständnis muß vorgebeugt werden: Die Ergründung "typischer" Vorverständnisse" zielt bei Redeker nicht auf die Konstruktion von Idealtypen ab. "Typisch" bezieht sich auf

die Funktion des Vorverständnisses, Handlungen "in der Typik" zu prägen (vgl. Redekers Definition). Redeker wendet sich gegen das Aufstellen fiktiver Vorverständnisse. Das Vorverständnis ist für ihn kein Konstrukt, also kein auf dem Wege der Interpretation dem Individuum vom Forscher unterstelltes, bzw. konstruiertes System von Vorstellungen. Schülervorstellungen seien prinzipiell nicht erhebbar. Ihre Aufstellung sei die Projektion von Denkstrukturen des Untersuchenden auf den Schüler. Niemand könne an den tatsächlichen Denkprozessen eines anderen teilhaben. Redeker sieht sein Ziel im Herausarbeiten dessen, "was faktisch als Vorverständnis fungiert" (Redeker 1978, 145; Hervorhebung d.Verf.). Wir meinen, Redeker übergeht hier das Faktum, daß jede Aussage, sei sie über Schülervorstellungen oder über typische Vorverständnisse, auf einer Interpretation beruht, bei der das Vorverständnis desjenigen, der die Aussage macht, in eine Wechselwirkung mit dem ihm zugänglichen Erfahrungsdaten eintritt. Aussagen über Denkprozesse bei Schülern sind ebenso wie physikalische Aussagen über die Ordnung der Natur immer Konstrukte. Man kann allenfalls über die Gegengstandsgemäßheit der Konstrukte streiten. Es ist unangemessen, von einer unmittelbaren "Faktizität" typischer Vorverständnisse zu sprechen.

Kommen wir zu den empirischen Untersuchungen Redekers. Wir werden sehen, daß die Aussagen über "faktische" Schülervorverständnisse sich von solchen über Schülervorstellungen (die bei uns Komponenten des individuellen Vorverständnisses sind) kaum unterscheiden. Ausgehend von der These, daß Vorverständnisse sich nur in konkreten Situationen anhand bestimmter Aufgaben zeigen, werden Situationen geschaffen, die den Schüler unterschiedliche Reaktionsmöglichkeiten offenlassen. Die Schüler sollen verschiedenen "Verweisungsbezügen" folgen können. Dem entspricht in unserem Ansatz das Offenhalten verschiedener möglicher Fragerichtungen oder Theorieansätze in einem am Schülervorverständnis orientierten Unterricht (SVU). Von den 8 Experimentalsituationen Redekers möchte ich drei charakteristische skizzieren: Zum Thema "Brechung" sollen die Schüler eine auf dem Boden einer mit Wasser gefüllten Porzellanschale liegende Münze mit einem Stab berühren, wenn sie die Köpfe so weit gesenkt haben, daß sie die Münze gerade noch sehen können. Im Bereich "Strom" wird den Schülern die Aufgabe gestellt, 23 Photographien (Wasserhahn, Kassettenrecorder, Kühlschrank usw.) danach zu sortieren, "welche Bilder zu dem Wort Strom passen oder nicht passen". In einem weiteren Aufgabentyp werden die Schüler ohne vorherige Erläuterungen mit Phänomenen konfrontiert (u.a. Cartesianischer Taucher). Die Aufgaben sind für klinische Forschungssituationen konzipiert, nicht für den Unterricht. (Bei uns wäre die Vorführung des Taucherphänomens ohne Worte ein guter Einstieg in einen SVU.) Sie sollen Schüler zu Handlungen und

Äußerungen stimulieren, aus denen der Untersuchende auf das Fungieren eines unthematisierten (den Schülern nicht gegenwärtigen) Horizontwissens schließen kann.

Durchgeführt wurde die Untersuchung an 148 Schülern der Klassen 3 bis 6, die in Vierergruppen jeweils 45 Minuten mit einer Auswahl aus den Aufgaben konfrontiert wurden. Die Reaktionen der Schüler wurden auf Videoband mitgeschnitten. In seiner Dissertation bezieht Redeker sich auf davon angefertigte Protokolle - allerdings mit der Einschränkung:

Die typischen Vorverständnisse und Erfahrungshorizonte herauszuarbeiten ist ... eine Angelegenheit der Interpretation der Situation ... für die die Protokolle zwar ein unverzichtbares Hilfsmittel bleiben, zu der ihre bloße Wiedergabe ... jedoch wenig beitragen könnte.
(Redeker 1978, 169)

In der folgenden Liste habe ich von Redeker herausgearbeitete typische Vorverständnisse festgehalten. Es fehlt dabei die Erklärung ihres Zustandekommens, für die Redeker auf Erfahrungen aus der Lebenswelt rekurriert.

- 1) "Der geknickte Stab ist eine Täuschung" (bei der Aufgabe 'Münze treffen')
- 2) "Ich täusche mich" (nicht: Ich werde getäuscht)
- 3) "Es gibt Erscheinungen, deren weitere Bestimmung nicht gelingen will"
- 4) "Licht ist eine notwendige Bedingung des Sehens"
- 5) "Spiegel geben die Möglichkeit, visuell zunächst Unzugängliches dennoch sehen zu können"
- 6) "Der Sinn von Handlungen in der Schule wird mir (dem Lernenden) oft erst nach Minuten, Stunden, Tagen ... klar"
- 7) "Wir sehen einen Gegenstand immer in einer Blickrichtung ohne Bogen"
- 8) "Man kann den gebrauchenden Umgang mit etwas in Übereinstimmung mit unseren Absichten bringen" (z.B. Spiegel)
- 9) "Durch Wasser kann man sehen"
- 10) "Man kann einen Gegenstand größer erscheinen lassen ohne ihn selbst zu verändern"
- 11) "Strom ist elektrischer Strom"
- 12) "Netzstrom ist der eigentliche Strom" (daher passen Batterien nicht zu Strom)
- 13) "Gleichen Wirkungen liegen gleiche Ursachen zugrunde"
- 14) "Die Aufgabe (Lämpchen zum Leuchten bringen) ist ein Test des Leistungsvermögens in Konkurrenz zu anderen" (→ "Ich war der Erste")
- 15) "Richtiger Stromdraht ist ummantelt"
- 16) "Bestimmte Materialien taugen für Stromtransport, andere nicht"
- 17) "Zum Strom paßt nur, was leiten kann"
- 18) "Leiter haben eine bestimmte Form" (lang, geringer Querschnitt)
- 19) "Jedes Geschehen muß eine Ursache haben"
- 20) "Luft hat die Eigenschaft, leichter zu sein als Wasser und daher oberhalb des Wassers ihren natürlichen Ort"

Wir wollen versuchen, diese Auswahl typischer Vorverständnisse zu ordnen. Zunächst fällt auf, daß die Liste, entgegen Redekers Abgrenzung typischer Vorverständnisse von Kenntnissen oder verbalisierbarem Wissen, Glieder enthält,

die wir für durchaus verbalisierbar halten und zur Vorverständniskomponente der Vorerfahrungen zählen würden.

Von "Komponenten des Vorverständnisses" zu sprechen, wäre bei Redeker nicht zulässig. Er führt einzelne typische Vorverständnisse (Plural!) an, während bei uns das individuelle, bzw. thematische Vorverständnis immer die Gesamtheit der für einen anstehenden Erkenntnisprozeß relevanten Dispositionen meint; eine Gesamtheit, in die typische Vorverständnisse Redekerscher Art als Elemente eingehen können. Uns erschiene es wenig sinnvoll alles "gewußte, thetische Wissen" aus dem Vorverständnis ausgrenzen zu wollen, wenn es darum geht, Erwartung, Verhalten und Wahrnehmungen zu untersuchen, denn natürlich ist dafür Gewußtes ebenso von Bedeutung wie eher verdeckt fungierende Rahmenvorstellungen und Präkonzepte.

Bei den von Redeker genannten typischen Vorverständnissen haben wir keine gefunden, die zu unseren Kategorien der themenspezifischen oder themenübergreifenden Interessen passen. Die Items 5, 9, 10 und 16 rechnen wir zu den Erfahrungen. Als Präkonzepte sehen wir die Items 4, 7, 12, 15, 17, 20, einschließlich der Assoziationen 11 und 18. Der Redekerschen Definition des "unthematisch fungierenden Vorverständnisses" entsprechen besonders die Items 2, 3, 6, 8, 13, 14, 19. Auch wir halten es für wichtig, zur Erklärung von Schüleräußerungen und -handlungen neben spezifischen Präkonzepten, Vorerfahrungen und Kenntnissen grundlegendere Denkrahmen heranzuziehen. Damit sind gemeint Vorstellungen über sinnvolle Gegenstände, Ziele und Methoden von Erkenntnisgewinnung in der natürlichen und technischen Umwelt, Werte, Interessen und Ordnungsmuster für Problemsituationen nach Art der typischen Vorverständnisse 6 oder 14. Wenn die Einordnung der von Redeker genannten typischen Vorverständnisse nicht immer eindeutig ist, so können wir sie doch als mögliche Bestandteile individueller oder thematischer (hier im Sinne von "auf eine Thema bezogen") Vorverständnisse auffassen.

Eine wichtige Gemeinsamkeit beider Ansätze besteht in der Annahme, daß jeder Zugang zu Phänomenen der natürlichen und technischen Umwelt geprägt ist durch das Fungieren eines Vorverständnisses. Das Vorverständnis steuert die erste, tastende Herstellung von Bezügen zwischen einem neuen Phänomen und bekannten Erscheinungen, die Projektion von verfügbaren Begriffen auf den neu zu erschließenden Sachverhalt. Lernen bedeutet für Redeker ebenso wie für uns eine Veränderung des Vorverständnisses. Lernanlässe entstehen nach Redeker dann, wenn das unthematisch fungierende Wissen als unangemessen thematisch werde, wenn es sich als falsche Lösung von der richtigen abhebe. Lernen fände

eigentlich nur durch negative Erfahrung statt. Notwendige Voraussetzung für das Lernen von Physik sei die Übernahme des "mathematischen Entwurfs der Natur".

Der Lernende muß das Wahrnehmbare als Bekundung des kausalgesetzlichen Zusammenhangs idealer Objekte neu "sehen" lernen und zwar entgegen der Tatsache, daß dieser Zusammenhang in keiner Beobachtung direkt zugänglich ist. Erst danach ist dem Lernenden die Möglichkeit gegeben, einen Teilzusammenhang des Gegenstandes der Physik isoliert zu denken, ihn zu quantifizieren usw.
(Redeker 1978, 332f)

Wie aber soll den Schülern der Zugang zur Physik ermöglicht werden, wenn, wie Redeker im Gegensatz zu Wagenschein meint, die Kinder sich nicht "auf dem Wege zur Physik" befinden? Redeker schlägt die Schaffung "aporetischer Situationen" vor. Das sind Umstände, die dem Schüler keinen Ausweg lassen, eine Aufgabe in seinem lebensweltlichen Vorverständnis zu lösen, bzw. ein Phänomen darin zu deuten. Der Schüler werde verunsichert, Antizipationen würden enttäuscht. In einer solchen Situation bestünde die Möglichkeit, nicht die Gewißheit, daß der Schüler den "Sprung" von der lebensweltlichen in die physikalische Hinsicht mache und die Bewußtseinsleistung der Ideation vollbringe. Der Übergang sei eine Leistung des Individuums und könne nicht durch bestimmte Aufgaben vorprogrammiert werden. Für die Fachdidaktik gelte es, Situationen zu finden, die die "Richtung des Sprungs" weisen.

Ein Beispiel mag das Gesagte erläutern: Typisches Vorverständnis im Bereich Strom: 'Zum Betrieb einer Lampe bedarf es einer Stromquelle (E-Werk, Batterie)'; aporetische Situation: Aufgabe, ein Lämpchen mittels Induktionsspule und Dauermagnet zum Leuchten zu bringen, ersatzweise Vorführung des Effekts durch den Lehrer; erwünschter neuer Verstehenshorizont: 'Erfahrbare Vorgänge (Leuchten) folgen aus nichterfahrbaren Ursachen, die es näher zu bestimmen gilt'.

Als Grundlage einer Zuwendung zu physikalischen Vorverständnissen sieht Redeker die Thematisierung ursprünglicher, lebensweltlicher Erfahrungen von Licht, Strom, Bewegung usw. Erst dann könne der Lernende die Hinsicht auf den physikalischen Gegenstand aufnehmen und er falle nicht zwangsläufig in gewohnte Verstehenshorizonte zurück (vgl. Redeker 1978, 373). Redeker geht damit, ebenso wie wir, von der Notwendigkeit der Aktivierung relevanter Vorverständnisse/Vorverständniselemente aus. Bei ihm ist dies Grundlage der Ideation. Wir wollen durch expliziten Vergleich von Schülervorstellungen und -interessen mit physikalischen Konzepten die Bewußtwerdung der Existenz unterschiedlicher Zugriffsweisen auf natürliche und technische Phänomene fördern, sowie deren jeweilige

Vor- und Nachteile offenlegen.

Redekers Modell zur Erschütterung und Veränderung lebensweltlicher Vorverständnisse ist nicht neu. "Aporetische Situationen" sind sicherlich äußerst fruchtbare Momente für die Erlangung von Einsichten in den Sinn des Erwerbs physikalischer Denkmuster. Dem steht jedoch die größere Einfachheit, Anpaßbarkeit und Vertrautheit lebensweltlicher Zugriffsweisen entgegen, deren grundsätzliche Erschütterung durch einzelne aporetische Situationen kaum gelingen wird. Wir bezweifeln die Evidenz von Redekers These des "Beispielverstehens", d.h. des Transfers punktueller Einsichten auf allgemeine Verstehenshorizonte. Oftmals bleiben lebensweltliche und physikalische Vorstellungen unvermittelt nebeneinander bestehen, wobei sich auf mittlere Sicht eher die lebensweltlichen durchsetzen. Daher plädieren wir dafür, die Herausarbeitung der Unterschiede der Zugriffsweisen zum Unterrichtsthema zu machen und nicht auf die Selbstinstallation physikalischer Vorstellungen aufgrund ihrer vermeintlichen Überlegenheit zu setzen. Es bestehen ohnehin Schwierigkeiten, wirklich überzeugende Beispiele zu finden, die Anlässe für das subjektive Gefühl bei Schülern sein könnten, sie befänden sich in einer "ausweglosen" Situation, die grundlegendes Umdenken erforderlich mache. Ad hoc Annahmen oder Nichtbeachtung sind ebenso wie in der Wissenschaft bewährte Verhaltensweisen beim Auftreten von Anomalien. Empirische Belege für Umdenkprozesse in aporetischen Situationen stehen noch aus. Solange Redeker sein Modell nicht exemplifiziert und in unterrichtliche Konsequenzen umsetzt, bleibt der konkrete vermittlungsbezogene Nutzen offen.

Wertung: Präkonzept und Vorverständnis

Zwischen dem Forschungsprogramm Jungs und dem unsrigen bestehen viele Gemeinsamkeiten. Sie beginnen mit Übereinstimmungen in der Ausgangsthese, daß Erkenntnishandlungen von Schülern auf einer Wechselwirkung zwischen Vorverständnis und Lehrangebot beruhen (Jung führt Lernschwierigkeiten auf nicht-antizipierte Wechselwirkungen zurück) und führen über ähnlich verstandene Begriffe (Präkonzept und Vorverständnis als funktionale, epistemologische Kategorien) zu methodischen Parallelen. Auf eine Reihe von Schwerpunktverlagerungen und Erweiterungen ist jedoch hinzuweisen. Der bei Jung umfassend gemeinte Terminus Präkonzept bezeichnet bei uns inhaltliche Ausprägungen und Verknüpfungen spezifischer Begriffe (z.B. Präkonzepte zu "Actio gleich Reactio"). Bei themenübergreifenden Vorstellungen und allgemeinen Denkschemata sprechen wir von Denkraumen. Wir beziehen in unser empirisches Forschungsprogramm explizit die Erhebung von Interessen ein. Wir glauben, daß Präkonzepte allein nicht ausreichen, um Schülerverhalten im Physikunterricht zu erklären. Bei der

Gewinnung der empirischen Basis steht bei uns die Methode der (Wort-) Protokollierung real ablaufenden Physikunterrichts in Grund- und Leistungskursen der Sekundarstufe II an erster Stelle. Schriftliche Befragungen und klinische Interviews, auf die Jung in reichhaltiger Form zurückgreift, haben bei uns eine nachgeordnete Funktion.

Eine Erweiterung der Interpretationsmöglichkeit des Schülerverhaltens verspricht die von uns vorgenommene Einbeziehung von Vorstellungen zu Gegenständen, Zielen und Methoden der Physik in das Vorverständnis. Spezifische Präkonzepte sind im Bereich der Mechanik durch eine bereits große Zahl von Forschungsberichten dokumentiert. Unsere Anstrengung auf diesem Gebiet liefern über eine Festigung des Kenntnisstandes hinaus nur wenige grundlegend neue Erkenntnisse. Unser vorrangiges Bestreben gilt der Verknüpfung von begriffs- oder phänomenspezifischen Präkonzepten mit Interessen und Denkraumen zu einer konsistenten Erklärungsbasis für Schülerverhalten in realen Unterrichtssituationen.

Trotz gleicher Termini ("Vorverständnis" bzw. "typisches Vorverständnis") sind inhaltliche und methodische Gemeinsamkeiten mit Redekers Forschungsprogramm weniger klar auszumachen. Das liegt zu einem Teil am geringen Umfang der vorliegenden empirischen Aussagen Redekers. Theoretisch ist sein Konzept überzeugend ausgearbeitet. Redeker kommt aus erkenntnisphilosophischer Sicht zu ganz ähnlichen Aussagen, wie wir sie aus wissenschaftstheoretischen Überlegungen über die Vorverständnis-Bedingtheit des Erkennens gewonnen haben. Wir vermissen bei Redeker die Umsetzung in unterrichtlich relevante Konsequenzen. Es scheint, als sträube er sich gegen eine, aus seiner Sicht vorschnelle, Instrumentalisierung und beharrt auf weiterer Fundierung der Theorie.

Hervorzuheben ist Redekers Herausarbeitung der Schwelle zwischen ursprünglich-lebensweltlichem und naturwissenschaftlichem Denken. Physiklernen bedeutet nicht einfach den sukzessiven Erwerb von Kenntnissen über physikalische Theorien, sondern parallel dazu oder, wie Redeker es formuliert, in Form einer "einführenden Verständigung" die Eröffnung der "physikalischen Hinsicht". Damit ist noch nichts darüber ausgesagt, wie die physikalische Hinsicht in den Blick des Schülers eingeht, bzw. eingebracht werden kann. Die physikalische Sichtweise der Welt kann Ergebnis eines langen Gewöhnungsprozesses sein. Nur, wenn der Physikunterricht für eine Gewöhnung zu wenig Zeit bietet, wie kann man dann auf andere Weise "lehrend" eingreifen? Redekers Konzept der "aporetischen Situation" hilft für die konkrete Gestaltung des Lernumfeldes kaum weiter. Unabhängig davon hat Redeker Recht: Der Erwerb physikalischer Kompetenz

ist an grundlegende Einsichten in die Art physikalischer Fragestellungen, Vorgehensweisen und Ergebnisfixierungen gebunden (wobei es nicht darauf ankommt, ob der Schüler sich der Einsichten bewußt ist). Bei uns schlägt sich diese These in der Einbeziehung von wissenschaftstheoretischen Elementen in das Vorverständnis nieder.

Ich habe mich bei der Darstellung des fachdidaktischen Forschungsstandes bezüglich Präkonzept/Vorverständnis auf zwei deutsche Ansätze beschränkt. Es ging mir um die Grundlagen von Programmen, nicht um inhaltliche Ergebnisse. Aus dem anglo-amerikanischen Raum liegt eine solche Fülle von Forschungsberichten und Grundsatzreferaten zu "misconceptions" vor, daß es mir zu aufwendig erschien, diese mit ähnlicher Intensität zu rezipieren. (Man werfe allein einen Blick in den 1000-seitigen Bericht des dreitägigen Seminars über "Misconceptions in Science and Mathematics"; Helm 1983.) Im Grundsatz liegen die amerikanischen Arbeiten auf der Linie Jungs. Ich werde ihre Resultate über Präkonzepte zur Newtonschen Mechanik in Kapitel C aufgreifen.

A.3

Anlage der Untersuchung

A.3.1

Grundannahmen und Begrifflichkeit

Nachdem wir den Begriff Vorverständnis in seiner didaktischen Funktion dargestellt und seine Querverbindungen zur Erkenntnistheorie, Wissenschaftstheorie und aktuellen Fachdidaktik aufgezeigt haben, wollen wir die Grundannahmen unseres Forschungsprogramms zusammenfassen und die wesentlichen Begriffe festlegen.

Annahme 1

Ein erkennendes Subjekt (z.B. Forscher, Schüler) wird bei der Wahl von Erkenntniszielen, beim Vollzug von Erkenntnishandlungen und bei der Fixierung von Erkenntnisprodukten von seinen bereits gebildeten Erfahrungen, Vorstellungen und Interessen usw. angeleitet. Alle aufgenommenen Informationen werden auf der Grundlage dieser vorgeformten Erkenntnisstruktur verarbeitet.

Definition 1

Wir nennen die Gesamtheit der Elemente, von denen Handlungen und die Aussagen eines Individuums beim Vollzug von Erkenntnisprozessen generiert werden, das individuelle Vorverständnis.

Das Vorverständnis hat auf der Ebene des Individuums die gleiche Funktion wie die "disziplinäre Matrix" (Kuhn) auf der Ebene der Forschergemeinschaft. Es ermöglicht durch die Bereitstellung von Orientierungsrahmen eine begründete Auswahl behandelnswerter Fragestellungen und Entscheidungen über relevante Beobachtungen, erfolgversprechende Lösungsansätze sowie den Typus der anzustrebenden Ergebnisse. Das Vorverständnis befähigt das Individuum, in die "hermeneutische Spirale" (Keller) der Auseinandersetzung mit einem Sachverhalt einzutreten.

Wir trennen zwischen Handlungen und Aussagen, weil den Aussagen als verbalen Handlungen, an den Unterrichtsanteilen gemessen, in der Sekundarstufe II besondere Bedeutung zukommt.

Annahme 2

Die Aussagen und Handlungen von Schülern im Physikunterricht sind rückführbar auf Wechselwirkungen ihrer individuellen Vorverständnisse mit Elementen der Handlungs- bzw. Problemsituation.

Die Anerkennung des unabdingbaren Fungierens des Vorverständnisses wird bei der Analyse von Denkprozessen und Verständnisschwierigkeiten von Schülern im Physikunterricht bedeutsam. Letztere können als Resultat fachsystematisch unproduktiver Wechselwirkungen zwischen Vorverständnis und Informationsangebot aufgefaßt werden.

Annahme 3

Es gibt bei den individuellen Vorverständnissen von Schülern, die der gleichen Altersgruppe angehören und die einen ähnlichen Physikunterricht durchlaufen haben, bezüglich eingrenzbarer Themen- und Phänomenbereiche gemeinsame Grundmuster. Man kann einen großen Teil der Handlungen und Aussagen auf das Fungieren einer begrenzten Menge typischer Vorverständniselemente zurückführen.

Die Beschaffenheit der dieser Arbeit zugrundeliegenden empirischen Datenbasis führt nicht zu Aussagen über individuelle Vorverständnisse einzelner Schüler, sondern zu generalisierenden Hypothesen über charakteristische Grundmuster. In den von uns konstruierten Vorverständniselementen ist die Vielfalt der individuellen Ausprägungen reduziert. Der Sinn der Erarbeitung einer Typik individueller Vorverständnisse besteht darin, das Spektrum der Vorverständniselemente überschaubar zu machen, um z.B. Unterrichtenden eine handhabbare Sammlung wichtiger Denkstrukturen vorstellen zu können, an denen potentielle Quellen von Kommunikations- und Lernschwierigkeiten im Physikunterricht aufzeigbar sind.

Definition 2

Wir nennen die Menge der generalisierten Vorverständniselemente einer homogenen Gruppe von Individuen, die sich auf einen begrenzten Themen- oder Phänomenbereich der Physik beziehen, das thematische Vorverständnis.

Ziel unserer Arbeiten ist die Konstruktion des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik und der Nachweis seiner Erklärungsmächtigkeit für Schülerverhalten in konkreten Unterrichtssituationen. (Das entsprechende empirische Forschungsprogramm wird unter Punkt A.3.3 beschrieben.)

Die Elemente des thematischen Vorverständnisses werden nach 4 Kategorien aufgeschlüsselt:

Denkrahmen: Vorstellungen übergeordneter Art zu Gegenständen, Zielen und Methoden der Physik; allgemeine Denkschemata und Problemlö-

sungsstrategien (z.B. Orientierung an vermeintlichen Verursachern von Vorgängen)

Präkonzepte: inhaltliche Ausprägungen spezifischer Begriffe, Erklärungsmuster für das Zustandekommen bestimmter Phänomene

Interessen: Disposition zur besonderen Zuwendung zu bestimmten Tätigkeiten oder Inhalten

Kenntnisse: abrufbare Wissens Elemente, die nicht notwendigerweise mit inhaltlichen Vorstellungen verknüpft sind (z.B. Formelkenntnisse)

Erfahrungen: abgespeicherte Wahrnehmungen von beobachteten oder selbst durchlebten Situationen, oft mit Deutungen verbunden, die die Form von Präkonzepten annehmen können

Die Festlegung der Kategorien beruht nicht auf einer kognitionspsychologischen Theorie. Die Kategorien sind nach fachdidaktischen Erwägungen zum Zwecke der Gliederung der Elemente des thematischen Vorverständnisses ausgelegt. Wir behaupten nicht, der psychische Apparat eines Individuums sei real nach den genannten Kategorien organisiert.

Bei der Darstellung des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik in Kapitel B werden die Elemente nach drei Komponenten geordnet:

- Denkraumen und allgemeine Interessen
- Präkonzepte und themenspezifische Interessen
- Kenntnisse und Erfahrungen

A.3.2

Zur Genese des eigenen Vorverständnisses

In einer Arbeit, bei der der Begriff Vorverständnis eine zentrale Stellung einnimmt, darf das individuelle Vorverständnis des Verfassers nicht unberücksichtigt bleiben. Der Forscher geht mit bestimmten Interessen, Erfahrungen, Kenntnissen, Präkonzepten an die Formulierung und Analyse eines Problems. Das, was er bevorzugt wahrnimmt, worauf er besonders achtet, aber auch was er übersieht, ist von seinem Vorverständnis geprägt. Aussagen über das Schülervorverständnis haben keine vorurteilsfreie Faktizität. Schülervorstellungen kann man nicht unmittelbar aus Wortprotokollen oder Fragebögen ablesen. Wir wollen daher die Einflußfaktoren aufzeigen, unter denen sich unser eigenes Vorverständnis herausgebildet hat. Die Erläuterung erfolgt anhand von Abbildung A7 (siehe folgende Seite). Sie entspricht im Grundmuster der Abbildung A1 (Seite 9), an der die Wechselwirkung von Vorverständnis und Situation im Erkenntnisprozeß eingeführt wurde. Zusätzlich enthält sie Verweise auf die Genese des Vorverständnisses.

Der große Rahmen, in dem die vorliegende Arbeit entstanden ist, wird durch den Begriff "unterrichtsnahe Fachdidaktik" beschrieben. Unsere Forschungsgruppe versteht darunter die enge Kooperation mit Physiklehrern verschiedener Schulen, die sich z.B. in der gemeinsamen Erprobung neuer Unterrichtsformen (SVU) und der Bereitstellung von Unterrichtsmaterialien (Bearbeitungen historischer Originaltexte, Experimentiergeräte) bis hin zur Entwicklung neuer Kurskonzepte (im Bereich Quantenphysik) erstreckt. Es bestand und besteht in gemeinsamen Arbeitsgruppen mit Mitgliedern unseres Projekts und interessierten Fachlehrern die Möglichkeit zur Diskussion von Forschungsergebnissen mit Schulpraktikern. Die Arbeitsgruppen entstanden zum Teil im Anschluß an mehrtägige Lehrerfortbildungsseminare. Diese Konstellation wirkte sich in zweifacher Weise auf das Forschungsprogramm aus:

- Durch den Zugang zu laufendem Physikunterricht konnte die Datenerhebung in großem Umfang in der Normalsituation des Physikunterrichts erfolgen. Die empirische Basis besteht ganz wesentlich aus Unterrichts- und Wortprotokollen.
- Neben der Leitidee, daß die Untersuchung sich eng an der Realität des Physikunterrichts zu orientieren habe, ergaben sich durch den persönlichen Kontakt mit Lehrern und Schülern zahlreiche Anregungen für untersuchenswerte Fragestellungen bis hin zu Ideen für schriftliche Testitems.

Ein zweiter wesentlicher Faktor, der das Vorverständnis des Verfassers geprägt hat, ist die langjährige Auseinandersetzung mit der Wissenschaftstheorie der Physik. Die Bedeutung der "New Philosophy of Science" für die Entwicklung des

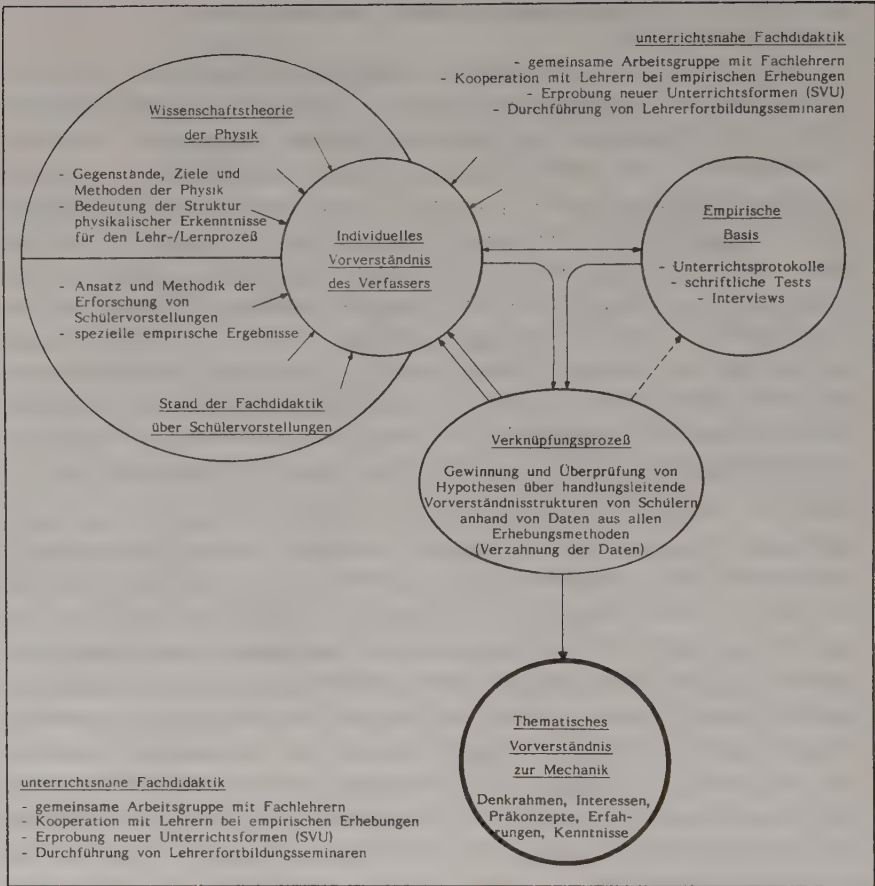


Abb. A7: Bedingungsfaktoren und Stellung des Vorverständnisses des Verfassers im Forschungsprozeß

Vorverständnisbegriffs wurde unter Punkt A.2.2 aufgezeigt. Neben im engeren Sinne wissenschaftstheoretischen Arbeiten haben erkenntnistheoretische Arbeiten (siehe Punkt A.2.1 und Studien, die epistemologische und fachdidaktische Fragen verknüpfen (z.B. Redeker 1978, Künzli 1982), unser Denken über Lernprozesse im Physikunterricht mitgeprägt (siehe dazu Punkt B.3.2.1).

Unsere Sichtweise der Charakteristika physikalischer Erkenntnisgewinnung läßt sich in fünf Thesen fassen:

These 1: Physik ist die Wissenschaft des "allgemeinen Falls". Sie bildet die Natur nach, indem sie dem komplexen Geschehen einfache Prinzipien unterstellt. Angestrebt wird die Konstruktion allgemeingültiger Prinzipien mit einem möglichst großen Objektbereich. Das erfordert das Ausblenden von akzidentellen Faktoren - mit anderen Worten: die Schaffung "reiner Phänomene".

These 2: Phänomene sind dann für die Physik interessant, wenn sie hoffen lassen, daß an ihnen verallgemeinerbare Begriffe und Beziehungen entwickelt werden können. Anwendungen physikalischer Theorien auf Einzelphänomene stellen Tests auf Bewährung der Theorie dar. Anders als in der Technik steht bei der physikalischen Theoriebildung nicht der praktische Wert der Ergebnisse im Vordergrund.

These 3: Die alltäglichen Erfahrungen, d.h. die unabhängig von physikalischer Kompetenz erfahrbaren Phänomene der natürlichen und technischen Umwelt, werden bei einer physikalischen Betrachtungsweise unter der Anleitung idealer Gestalten selektiert und transformiert. Dabei geht viel von der ursprünglichen Komplexität verloren. Viele Alltagsphänomene sind physikalisch nur prinzipiell, nicht im Detail, erklärbar.

These 4: Die Welt "physikalisch sehen lernen" heißt mehr als die Welt anders - genauer, quantitativer, apparativer - zu betrachten; es bedeutet, eine andere Welt zu sehen. Ein Physiker sieht Massepunkte oder starre Körper, die sich auf exakten Bahnkurven durch eine Welt mit Maßstäben und Uhren bewegen. Er entdeckt in der Wurfbewegung den freien Fall wieder und erkennt im Fall eines Apfels vom Baum und in der Bewegung des Mondes um die Erde zusammengehörige Phänomene.

These 5: Die physikalische Erkenntnisgewinnung vollzieht sich als kollektiver Prozeß in der Wissenschaftlergemeinschaft. Kreativ-spekulative Schlüsse, die sich im wissenschaftlichen Diskurs bewähren, bringen die Disziplin voran. Die Induktionslogik handelt von der Überprüfung von Theorien (vgl. Carnap 1959, 9). Sie behauptet nicht, man könne Gesetze ohne Intuition, Spekulation und Glück streng

logisch aus Experimenten ableiten. Weder die formale Logik noch empiristische Postulate bestimmen die Rationalität der Physik. Experimente dienen der Realisierung von Theorien. Sie sind der Versuch, eine der Theorie entsprechende Realität zu schaffen.

Diese Präkonzepte und das Interesse des Verfassers an wissenschaftstheoretischen Fragen erklären, daß ein Untersuchungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit bei Vorstellungen von Schülern über Gegenstände, Ziele und Methoden der Physik liegt (Komponente I des thematischen Vorverständnisses). Dabei konnte auf vorhandenen Arbeiten aufgebaut werden (Zusammenfassung in Krüger 1982). Die obigen Thesen machen den Aufbau des schriftlichen Tests VWP (Vorstellungen über die Wissenschaft Physik) verständlich (siehe Punkt B.2.2.1) und umreißen einen wichtigen Teil des Interpretationshintergrunds, vor dem die Analyse des Datenmaterials erfolgt ist. Des weiteren wird verstehbar, daß bei den im thematischen Vorverständnis dargestellten Denkrahen und allgemeinen Interessen von Schülern solche im Vordergrund stehen, die in einem gewissen Gegensatz zu der oben umrissenen Position stehen, denn für solche Elemente sind wir aufgrund unseres eigenen Vorverständnisses besonders sensibilisiert.

Der dritte wichtige Einflußfaktor auf das Vorverständnis des Verfassers und damit auf die Anlage der Untersuchung ist durch den im Bereich der klassischen Mechanik hochentwickelten Stand der fachdidaktischen Forschung über Schülervorstellungen gegeben. Im Gegensatz zu Gebieten wie der Atom- und Kernphysik liegen zahlreiche Forschungsberichte vor, aus denen einerseits Anregungen für eigene empirische Erhebungen erwachsen sind und die andererseits durch ihre spezifischen Aussagen unsere Zugangsweise zum erarbeiteten empirischen Material vorstrukturiert haben. Das gilt insbesondere für Präkonzepte, über die eine umfangreiche Literatur besteht (Stichworte "Fehlvorstellungen", "misconceptions", "alternative frameworks"). Wir haben parallel zu den eigenen Arbeiten den Forschungsstand über Schülervorstellungen zur Mechanik aufgearbeitet. Er wird in Kapitel C wiedergegeben. Hinsichtlich des konzeptuellen Ansatzes der Erforschung von Schülervorstellungen sind Anregungen hauptsächlich von der Frankfurter Arbeitsgruppe um Walter Jung ausgegangen (siehe dazu Punkt A.2.2). Jung hat aus fachdidaktischer Sicht auf die Bedeutung von Denkrahen, oder, wie er es nennt, "konzeptuellen Organisatoren auf kategorialer Ebene" (z.B. "Substanz - Qualität"; vgl. Jung 1978, 127) hingewiesen.

Im Verknüpfungsprozeß (siehe Abbildung A7) ergaben sich aus der Wechselwirkung des in der oben beschriebenen Weise strukturierten Vorverständnisses des Verfassers mit dem Datenmaterial aus Unterrichtsprotokollen, schriftlichen Tests und

Kurzinterviews Hypothesen über handlungsleitende Vorverständnisstrukturen von Schülern. Das Vorverständnis des Verfassers erfuhr durch die gebildeten Hypothesen ständige Erweiterungen und Veränderungen. Neue Hypothesen führten zu veränderten Wahrnehmungsmöglichkeiten, die einen erweiterten Zugang zum Datenmaterial eröffneten. So wurden die Wortprotokolle im Verlaufe der Forschungsarbeiten jeweils in zeitlichen Abständen mehrmals analysiert, so daß sich der Vorrat an Belegen und Gegenbeispielen zu bestimmten Hypothesen ständig verbreiterte, weil altes Material unter zusätzlichen Aspekten neu gesehen wurde (Form der "hermeneutischen Spirale"; siehe Seite 40). Außerdem ergab sich die Notwendigkeit, für die Überprüfung einzelner Hypothesen die empirische Basis gezielt zu erweitern, z.B. um Präkonzepte, die aufgrund von Wortprotokollanalysen postuliert worden waren, in einer schriftlichen Erhebung an einer breiteren Population zu testen (Rückwirkungspfeil vom Verknüpfungsprozeß zur empirischen Basis). Zwei Beispiele für die im Verknüpfungsprozeß erfolgenden Schritte sind unter Punkt B.2.3 angeführt. Der prinzipielle Weg der Konstruktion von Vorverständniselementen und die Entscheidung über die Aufnahme in das thematische Vorverständnis zur Mechanik wird im folgenden Punkt näher beschrieben.

A.3.3 Empirisches Forschungsprogramm

Der Ablauf des empirischen Teils unserer Arbeiten über das Schülervorverständnis zur Mechanik ist in der Abbildung A8 skizziert (siehe folgende Seite). Die Datenbasis enthält zunächst die Ergebnisse zweier größerer Felduntersuchungen mit Verständnis-, Assoziations- und Interessentesis sowie Befragungen zu Vorstellungen über Gegenstände, Ziele und Methoden der Physik. Kernstücke sind zusammenhängende (Wort-) Protokollierungen des Unterrichtsgeschehens in zwei Leistungskursen und einem Grundkurs Mechanik der 11. Jahrgangsstufe. Dazu kommen Aufzeichnungen über das Schülerverhalten in sogenannten SVU-Phasen (am Schülervorverständnis orientierter Unterricht; siehe Fallstudie 2, Punkt E.3) mit einem hohem Anteil an Eigenaktivität der Schüler. Aus der Sichtung und Ordnung der Daten nach Begriffen und Phänomenen gelangen wir zu Listen mit häufig anzutreffenden Ausdrucks- und Verhaltensweisen von Schülern bei der Beschreibung und Erklärung bestimmter Sachverhalte. Für Aufschlüsse über das Schülervorverständnis sind besonders die von der Lehrbuchnorm abweichenden Beschreibungsweisen heranzuziehen, d.h. solche, die physikalisch falsch klingen oder die auf eigenständige Schülerideen schließen lassen.

Auf der Grundlage des im vorigen Punkt erläuterten eigenen Vorverständnisses entwickeln wir Hypothesen über Denkraumen, Präkonzepte usw., mit denen das dokumentierte Schülerverhalten auf generalisierte Denkstrukturen zurückgeführt wird: Wir konstruieren Vorverständniselemente. Mit Hilfe der gewonnenen Konstrukte versuchen wir, weitere Ausschnitte aus der Datenbasis, und zwar Datenmaterial aus unterschiedlichen Erhebungsverfahren, zu interpretieren. Es werden Beispiele (und auch Gegenbeispiele) in Form von Unterrichts- oder Testsituationen gesammelt, bei denen die Annahme des Fungierens bestimmter Vorverständniselemente das Schülerverhalten plausibilisiert. Die Elemente, die sich dabei bewähren - besonders solche, die Verständnisprobleme von Schülern erklären können - gehen in das thematische Vorverständnis ein.

Die Erklärungsmächtigkeit dieses Konstrukts wird daran geprüft, ob es gelingt, bei seiner Zugrundelegung und bei Kenntnis der Rahmenbedingungen einer Unterrichtssituation, konkretes Schülerverhalten zu rekonstruieren. Unter Rekonstruktion verstehen wir die Erklärung bestimmter Verhaltensweisen aus einer Wechselwirkung von Elementen des thematischen Vorverständnisses, in denen die Typik individueller Vorverständnisse zum Ausdruck kommt, mit den Gegebenheiten der Unterrichtssituation (experimentelle Anordnungen, Lehrerfragen, Aufgabenformulierungen usw.). Dafür werden aus der Datenbasis neue Fallbeispiele herangezogen, vorzugsweise Unterrichtsprotokolle aus Situationen, in denen Schüler ein

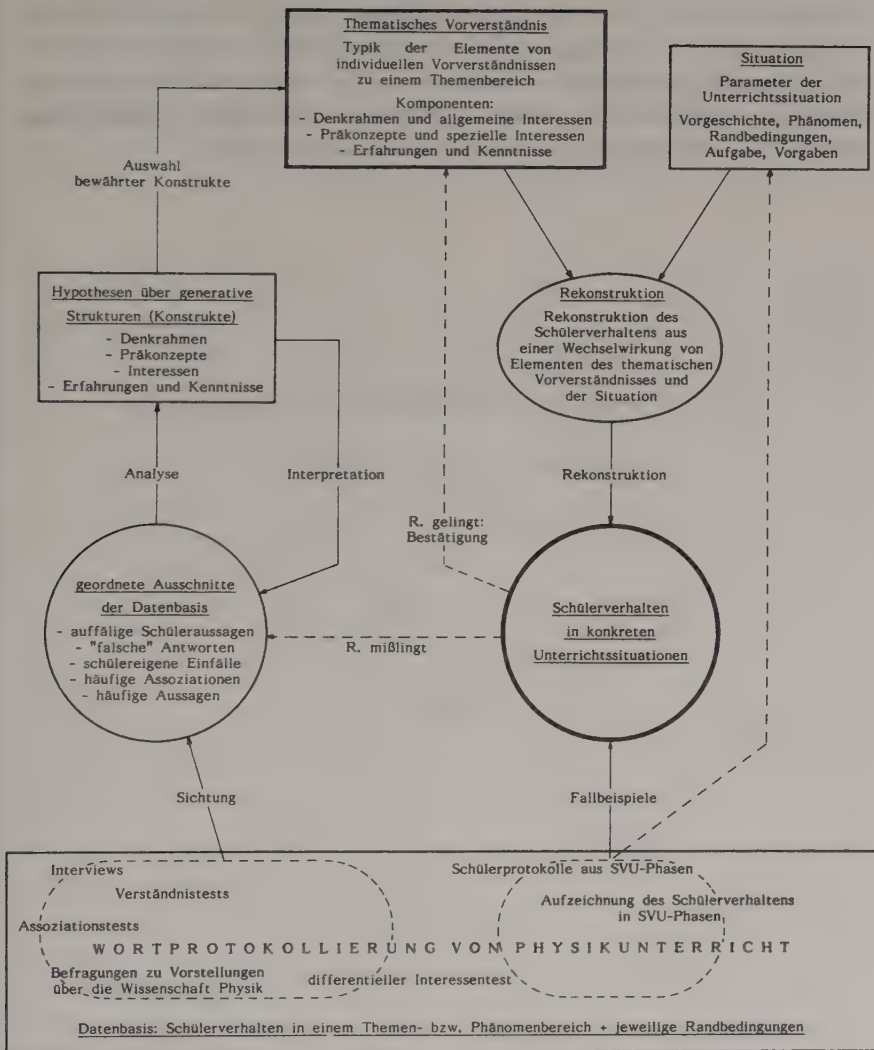


Abb. A8: Übersicht über das empirische Forschungsprogramm

Lehrangebot nicht in der vom Lehrer intendierten Weise aufnehmen, oder Situationen, in denen Kommunikationsprobleme zwischen Lehrer und Schülern bestehen. Gelungene Rekonstruktionen erhärten die im thematischen Vorverständnis vorliegende Erklärungsbasis. Gelingt die Rekonstruktion nicht zufriedenstellend, müssen neue fungierende Vorverständniselemente gesucht werden.

Kapitel B

DAS THEMATISCHE VORVERSTÄNDNIS ZUR MECHANIK

Empirische Basis und Ergebnisse

B.1

Einleitung

Im Hauptteil des Kapitels B (Punkt B.3) werden die Denkrahmen, allgemeinen Interessen, Präkonzepte, spezifischen Interessen, Erfahrungen und Kenntnisse, die wir zum Kern des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik zählen, in Thesenform vorgestellt, in ihrer Grobstruktur umrissen und anhand von Daten aus den verschiedenen empirischen Erhebungsverfahren eingehend diskutiert. Eine Kompaktdarstellung der Elemente findet sich am Ende des Kapitels unter Punkt B.4).

Der Ablauf des Forschungsprogramms, das zu den hier dargestellten Ergebnissen geführt hat, wurde unter Punkt A.3.3 erläutert. An zwei konkreten Beispielen wird unter Punkt B.2.3 die Methodik der Konstruktion von Vorverständniselementen und die kritische Würdigung ihrer Aussagekraft für die Interpretation von Schülerverhalten bis hin zur Entscheidung über ihre Aufnahme in das thematische Vorverständnis beschrieben.

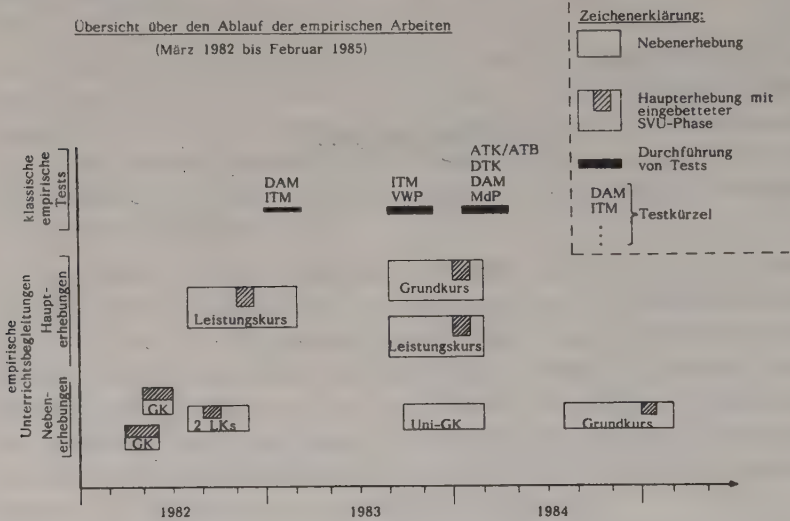
Da die Datenbasis praktisch unbegrenzt ausbaufähig ist, befindet sich der Prozeß aus Datengewinnung, Konstruktion und Überprüfung von Vorverständniselementen ständig im Fluß. Unsere empirischen Arbeiten haben jedoch einen Stand erreicht, auf dem sich das entwickelte thematische Vorverständnis zur Mechanik bei der Rekonstruktion von Schülerverhalten gut bewährt. Entscheidende Erweiterungen oder gravierende Reformulierungen sind nicht abzusehen. Dies gilt um so mehr, als die Vorverständnis-Konstrukte sich in den internationalen Forschungsstand einpassen, bzw. ihn konsistent erweitern (siehe Kapitel C).

Am Beginn des Kapitels B stellen wir die Datenerhebungsverfahren vor, die zum Aufbau der empirischen Basis verwendet wurden.

B.2

Die empirische Basis

In der folgenden Übersichtsgaphik ist der zeitliche Ablauf der empirischen Arbeiten mit den jeweiligen Untersuchungsmethoden dargestellt, aus denen die Basis für die Konstruktion des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik gewonnen wurde. Die Verfahren der empirischen Unterrichtsbegleitung und die eingesetzten schriftlichen Tests werden unter den Punkten B.2.1 und B.2.2 im einzelnen beschrieben.



In den empirischen Arbeiten sind zwei Untersuchungsstränge zu unterscheiden:

1. Empirische Unterrichtsbegleitungen mit

- Haupterhebungen:** fortlaufende Protokollierung der Unterrichtsverläufe in 3 Mechanikkursen der Sekundarstufe II über jeweils 7 Monate, ständige Audio-Aufzeichnung der Unterrichtsgespräche und deren Transkribierung, Auswertung von Klausurarbeiten und Gespräche mit Schülern während Gruppenarbeitsphasen
- Nebenerhebungen:** empirische Begleitung von 4 gymnasialen und einem Hochschulkurs Mechanik, in denen nach Themenschwerpunkten und Unterrichtsformen ausgewählte Abschnitte mit den unter a) beschriebenen Verfahren untersucht wurden

Schülvorverständnisorientierte Unterrichtsabschnitte mit einem hohen Anteil von experimenteller Eigentätigkeit der Schüler (SVUs) stellten sowohl in Haupt- wie in Nebenerhebungen Untersuchungsschwerpunkte dar. Hier wurden

die Vorgehensweisen der Schülergruppen im einzelnen protokolliert; schriftliche Kurzbefragungen zu Zielen und Ergebnissen der bearbeiteten Themen und zur Einschätzung der Unterrichtsform durchgeführt; die von den Schülern abgegebenen Verlaufsprotokolle analysiert sowie Interviews mit den Schülergruppen gemacht.

2. Klassische empirische Tests (Einzelbeschreibung unter Punkt B.2.2)

Nach einer Vorerprobung der Tests DAM (Denkaufgaben Mechanik) und ITM (Interessenstruktur im Themenbereich Mechanik) an einer kleineren Schülerpopulation (N = 60) wurden zwei große Befragungen mit Testpaketen durchgeführt:

a) Befragung 1: Grund- und Leistungskurse der 11. und 12. Jahrgangsstufe (N = 449)

- ITM: differentieller Interessentest nach der Methode von Todt (1978)
- VWP: Vorstellungen über die Wissenschaft Physik (Stellungnahmen zu Aussagen über Gegenstand, Ziele und Methoden der Physik, offene Frage zum Verhältnis von Physik und Alltag)

b) Befragung 2: Grund- und Leistungskurse der 11. Jahrgangsstufe nach Abschluß der Mechanik-Kurse (N = 254)

- DAM: 7 Denkaufgaben zur Mechanik
- ATK, ATB, DTK: Assoziations-tests zu den Stichworten "Kraft" und "Bewegung", Definitionstest Kraft; nach Schaefer (1980)
- MdP: 2 Aspekte der Methodik der Physik werden zur Diskussion gestellt (offene Antworten)

Zwischen den beiden Untersuchungssträngen bestanden Querverbindungen. So beruhen einige Aufgaben des Tests DAM auf Hypothesen über Präkonzepte, die aus der vorangehenden Auswertung von Wortprotokollen gewonnen wurden und die an einer größeren Schülerpopulation getestet werden sollten. Gleiches gilt für den Test MdP, der wesentlich auf dem postulierten Denkrahn 1 ("Realisationsdenken", siehe B.3.2.1.1) und dem Präkonzept 3 ("Kraft als universelle Wirkungsfähigkeit", siehe B.3.3.2.1) basiert. Andererseits gaben z.B. die Ergebnisse des schriftlichen Tests VWP Anregungen dafür, einem daraus ermittelten empiristischen Verständnis der Erkenntnisgewinnung der Physik in Wortprotokollen nachzuspüren.

Bei der Gewinnung und der Auswertung des Datenmaterials handelte es sich um ein iteratives Verfahren. Der jeweilige Stand der Auswertungsarbeiten ergab Hinweise darauf, in welchen Bereichen, entweder über schriftliche Tests oder

Unterrichtsbeobachtungen, weitere Daten erhoben werden mußten. Aus der Sichtung neuen Datenmaterials erwuchsen neue Fragestellungen, unter denen bereits bearbeitetes Material erneut analysiert werden konnte.

Im folgenden werden die Datenerhebungsmethoden und die verwendeten Tests dargestellt. Bei der Entwicklung und Diskussion der Elemente des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik im Hauptteil des Kapitels B (B.3) werden wir uns jeweils auf Teile der hier vorgestellten empirischen Basis beziehen.

B.2.1 Unterrichtsprotokolle

Die Protokollierung des Unterrichtsverlaufs von Mechanikkursen in der Sekundarstufe II erbrachte die wohl wichtigsten Beiträge zur empirischen Basis. Auf Wortprotokollen beruht insbesondere die Rekonstruktion des Schülerverhaltens in konkreten Unterrichtssituationen, an der die Erklärungsmächtigkeit des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik zu messen ist.

B.2.1.1 Technik der Erstellung und Umfang des Materials

Für eine durchgehende empirische Begleitung des Kursabschnitts Mechanik, der sich in Bremen und Niedersachsen bis in das zweite Halbjahr der 11. Jahrgangsstufe erstreckt, wurden drei Kurse eines Bremer Gymnasium ausgewählt:

- 1 Leistungskurs im Schuljahr 1982/83 (LK1, 16 Schüler)
- 1 Leistungskurs im Schuljahr 1983/84 (LK2, 18 Schüler)
- 1 Grundkurs im Schuljahr 1983/84 (GK1, 14 Schüler)

In Neben- und Ergänzungserhebungen wurde der Unterricht abschnittsweise in 5 weiteren Kursen überwiegend anderer Schulen begleitet.

Mit dem Einverständnis der beteiligten Schüler und Lehrer wurden die Unterrichtsgespräche fortlaufend auf Tonband aufgezeichnet (Grundkurse 3 Wochenstunden, Leistungskurse 6 Wochenstunden). In mindestens der Hälfte der Stunden war der Untersuchende persönlich anwesend, um Demonstrationsexperimente, Tafelbilder, Handlungsverläufe in Stillarbeits- und Schülerexperimentierphasen usw. festzuhalten.

Nach Abhören der Mitschnitte entschied der Verfasser, welche Teile des Unterrichtsdiskurses zu transkribieren waren. Die Wortprotokolle erstellte der Untersuchende weitgehend selbst. Die persönliche Kenntnis der Unterrichtssitua-

tion und der beteiligten Schüler erhöhte die den Bändern entnommene Informationsmenge wesentlich. Wegen des großen Umfangs des anfallenden Materials ließ sich eine teilweise Übertragung der Arbeiten auf studentische Hilfskräfte nicht umgehen.

Von einem Transkript ausgenommen wurden:

- Stillarbeitsphasen.
- Unterrichtsphasen, in denen es überwiegend um mathematische Probleme ging (z.B. bei der Bearbeitung von Übungsaufgaben).
- Experimentelle Schülerarbeitsphasen (hier war wegen des allgemeinen Lärmpegels die Verständlichkeit der Aufzeichnungen meist zu sehr eingeschränkt).

Die genannten Kriterien galten als grobe Leitlinien. Die konkrete Entscheidung wurde in jedem Einzelfall getroffen, wobei die verfügbaren Ressourcen ein weiteres Auswahlkriterium darstellten. Nicht wortprotokollierte Stunden wurden durch kurze Inhaltsübersichten wiedergegeben. Der Ablauf der drei intensiv begleiteten Kurse kann zusammenhängend über jeweils 6 Monate nachvollzogen werden.

Zur Transkribierung ausgewählte Mitschnitte waren folgendermaßen zu behandeln:

- Alle Schüleräußerungen ungekürzt, wörtlich zitieren.
Auslassungen und sinngemäße Wiedergaben, die aufgrund mangelnder Sprachverständlichkeit notwendig sind, kennzeichnen (durch "..."). Auch Zwischenrufe zitieren (z.B. Mißfallensäußerungen, Scherze usw.).
- Längere Lehreraussagen dürfen gekürzt werden, wenn ihr Gehalt erkennbar bleibt. Lehrerfragen ungekürzt zitieren.
- Schüleraussagen mit Namen versehen (in veröffentlichten Protokollen sind die Namen geändert). Wenn Namen nicht zugeordnet werden können, zumindest für kleinere Abschnitte, die Schüler durchnummerieren. Beispiel:

Schüler 1 :
Lehrer :
Schüler 1 :
Schüler 2 :
Lehrer :
Schüler 3 :
Schüler 2 :

Im Beispiel ist erkennbar, daß die 1. und 3. sowie die 4. und letzte Aussage von gleichen Schülern stammen.

- Längere Pausen im Unterrichtsgespräch, z.B. nach Lehrerfragen, kennzeichnen (durch " - ", " - - " oder " - - - ").
- Aussagen gegebenenfalls mit erläuternden Zusätzen versehen (z.B. "Lehrer/

Schüler verärgert", "als Witz gemeint", "ironischer Unterton").

- In das Protokoll Informationen über den Einsatz von Experimenten und Medien einarbeiten (z.B. Skizze eines Versuchsaufbaus, Tafelbild, verteilter Umdruck).

Die auf diese Weise gewonnenen Wort- und Verlaufsprotokolle haben folgenden Umfang:

- LK1: 185 Seiten
- LK2: 201 Seiten
- GK1: 130 Seiten
- Nebenerhebungen: ca. 180 Seiten.

In Veröffentlichungen sind die Originalprotokolle redaktionell überarbeitet. Die Namen der Schüler werden geändert. Die Sprache wird insoweit geglättet, wie dies zur Erleichterung des Verständnisses einer Aussage nötig ist, ohne dabei ihren Sinn zu berühren. Dabei wird sehr behutsam mit den Aussagen umgegangen und die Originalfassung so weit wie möglich beibehalten. Wenn es zur Reduzierung des teilweise beträchtlichen Umfangs der zitierten Passagen auf ein vertretbares Maß notwendig ist, werden Aussagen, die nicht zum Fortlauf des eigentlichen Gedankenganges beitragen, weggelassen.

B.2.1.2 Einige Aspekte der Datengewinnung durch Wortprotokolle

Die Datengewinnung über Wortprotokolle hat gegenüber Fragebogenerhebungen und klinischen Interviews eine Reihe von Vorteilen:

1. Die Konstruktion von Präkonzepten, Denkraumen und Interessen kann auf Daten aufgebaut werden, die in der Normalsituation des Unterrichts erhoben wurden. Es kann gezeigt werden, daß bestimmte Schülervorstellungen nicht etwa durch klinische Testsituationen induziert werden, sondern daß die postulierten Vorverständniselemente im Unterricht verhaltensbestimmend fungieren.
2. Die Schüler äußern sich, wenn man von der generellen schulischen "Zwangssituation" absieht, aus eigenem Antrieb. Durch die Größe der Gruppen (14 bis 20 Schüler) ergeben sich für den Einzelnen Denkpausen, in denen er sich zurückziehen kann, um ungestört nachzudenken. In Einzel- oder Kleingruppeninterviews ist der Proband ständig gefordert und sieht sich zu Äußerungen quasi gezwungen. Die Schulsituation ist offener. Sie läßt den Schülern, bei entsprechend angelegtem Unterricht, mehr Spielraum für die Einbringung eigener, auch spontaner Einfälle.

3. Zusammenhängende Wortprotokollierungen über 1 bis 2 Schulstunden erlauben das Nachzeichnen von Kommunikationssituationen. Es kann verfolgt werden, wo Schüler bei einem zur Diskussion gestellten Phänomen von sich aus Beobachtungsschwerpunkte setzen, welche Erklärungsansätze sie bevorzugt verfolgen und wo sich Widerstände gegen Lehrerintentionen ergeben. Dadurch wird der Zugang zu Schülerinteressen eröffnet.

4. Der Nutzen der Erforschung des Vorverständnisses kann an Fallstudien demonstriert werden, die wegen der generellen Vertrautheit mit der Situation "Unterricht" gut nachvollziehbar sind. Die Interpretation von längeren Unterrichtspassagen vor dem Hintergrund eines postulierten thematischen Vorverständnisses kann exemplarisch die Ursachen und Erscheinungsformen von Lernschwierigkeiten und das Entstehen von unterrichtlichen Konflikten veranschaulichen. Gegenseitiges Nicht- bzw. Mißverstehen von Lehrer und Schülern wird in der unmittelbaren Kommunikationssituation von den Beteiligten oft nicht erkannt. Das Verfolgen solcher Prozesse aus der Distanz des Wortprotokolls kann typische Konfliktsituationen erhellen.

Voraussetzung für die Einlösung dieser Möglichkeiten ist das Verfügen über Wortprotokolle, in denen die Vorverständniselemente der Schüler sich erkennbar in Äußerungen und Verhalten manifestieren. Bei der Auswahl der Kurse wurde daher zu solchen Lehrern Kontakt aufgenommen, deren Unterrichtsstil einen möglichst großen aktiven Anteil der Schüler am Unterrichtsgeschehen sicherte. In einem dozierenden Frontalunterricht, in dem die Schüler überwiegend rezipieren und selten eigene Ideen einbringen und verfolgen können, läuft die Wechselwirkung zwischen Vorverständnis und Lehrangebot verdeckt ab. Je enger die Lehrerfragen sind und je schneller Schülerideen unterdrückt werden, die von den Vermittlungszielen des Lehrers abweichen, um so schwieriger ist es, auf dem Protokollmaterial eine Vorverständnisanalyse aufzubauen. Geeignet sind dagegen Stunden, die sich auszeichnen durch wenig Lehrervortrag, fragend-entwickelnden (sokratischen) Unterricht, offen gestellte Fragen, Eingehen auf Schülerideen, zahlreiche spontane Schüleräußerungen.

Der Untersuchende hielt sich an die Rolle eines passiven Beobachters. Die Gestaltung des Unterrichts wurde von den Fachlehrern getragen. Die Kurse sollten in ihrer Normalform ablaufen. Eine Ausnahme bildeten die SVUs, die ein- bis zweimal pro Kurs über einen Zeitraum von 8 bis 12 Schulstunden durchgeführt wurden. Sie wurden vom jeweiligen Lehrer und vom Untersuchenden gemeinsam geplant und durchgeführt.

Neben den Tonbandaufzeichnungen des Unterrichts im Klassenverband stehen

als weitere Datenquellen zur Verfügung:

- Kopien von Klausuren.
- Aufzeichnungen des Verlaufs der Gruppenarbeit in SVUs: Handlungsverläufe, abgegebene Schülerprotokolle, Kurzbefragungen während des SVU zu den gewählten Themen, (Zwischen-) Ergebnissen und Bewertungen der Unterrichtsform.
- Kurzinterviews mit Schülern.

Die Protokollierung der SVUs ist für die Hypothesengewinnung über das Vorverständnis besonders aufschlußreich, weil die Schüler, bei weitgehender Zurückhaltung von Vorgaben und Eingriffen in Arbeitsverläufe, eigene Fragestellungen verfolgen. Dabei werden auch Vorverständniselemente aktiviert, die im Normalunterricht verdeckt bleiben. Die Schüler erfahren in SVUs praktische Konsequenzen ihrer Präkonzepte, Denkraumen und Interessen: Fragestellungen erweisen sich als lösbar/nicht lösbar, Erklärungsansätze, die auf bestimmten Präkonzepten und Denkraumen beruhen, führen zum Erfolg oder verwickeln sich in theoretische Widersprüche (z.B. wenn Schüler mittels " $F = m \cdot a$ " die "Aufprallkraft" einer Kugel bestimmen wollen). Die Schüler können in SVUs nicht darauf vertrauen, daß der Lehrer ihnen sagt, "was richtig ist". Sie sind zu einer eigenständigen Auseinandersetzung mit den auftretenden Problemen gezwungen. Aus der Aufzeichnung solcher Phasen ergibt sich besonders wertvolles Material für Interpretationen.

Die Datengewinnung über Unterrichts- und Wortprotokolle hat neben ihren Vorteilen auch eine Reihe von Durchführungsproblemen:

- Die Methode ist sehr zeit- und arbeitsintensiv.
- Es wird nur das "offizielle" Unterrichtsgespräch aufgezeichnet. Gespräche von Schülern untereinander gehen verloren.
- Die Akustik von Klassenräumen beeinträchtigt die Qualität der Tonaufzeichnungen. Aussagen können nicht immer wörtlich transkribiert werden.
- Es stehen nur Aussagen solcher Schüler zur Verfügung, die sich verbal am Unterricht beteiligen. Das Unterrichtsgeschehen wird überwiegend von 6 bis 8 Schüler pro Kurs getragen.
- Auch bei einer begrenzten Zahl verbal aktiv beteiligter Schüler kann es dazu kommen, daß unterschiedliche Gedankengänge von verschiedenen Schülern im Unterrichtsgespräch miteinander interferieren, bzw. daß Schüler mit ihren Ideen nicht zum Zuge kommen.

Bei der Reduktion des Unterrichtsgeschehens auf die verbalen Anteile und deren anschließender Transkribierung geht viel an Information verloren. In die Wortpro-

tolle eingefügte Skizzen von Experimenten, Tafelbilder und ergänzende Hinweise (z.B. "große Unruhe in der Klasse" oder "Schüler sind enttäuscht") können das nur zum Teil auffangen. Videoaufzeichnungen hätten den technischen Aufwand in einem Maße gesteigert, der beim Umfang der begleiteten Unterrichtsstunden nicht zu vertreten gewesen wäre. Außerdem hätten Bildaufzeichnungen einen größeren Eingriff in das normale Unterrichtsgeschehen dargestellt als der Kassettenrecorder, an den die Schüler sich schnell gewöhnten. Ein weiterer, wesentlicher Grund für den Verzicht auf Videomitschnitte liegt darin, daß im Physikunterricht der Sekundarstufe II, man mag das bedauern, die verbalen Anteile gegenüber Phasen mit experimenteller Eigentätigkeit der Schüler eindeutig dominieren.

Unterrichtsprotokolle können nicht die einzige Form der Datenerhebung sein. Fragebögen und Interviews besitzen in mancher Hinsicht klare Vorteile:

- Ihre Datendichte ist größer. Antworten auf Testaufgaben oder gezielte Interviewfragen sind kompakter.
- In Interviews besteht die Möglichkeit der unmittelbaren Nachfrage, um den Schüler anzuhalten, einen für die Vorverständnisforschung interessanten Aspekt vorhergehender Aussagen zu vertiefen. Während des Unterrichts bestand für den Verfasser dazu keine Möglichkeit.
- Fragebögen erfassen eine weitaus größere Zahl von Versuchspersonen.
- Die Erhebungssituation kann durch die Gestaltung von Testaufgaben und Interviewleitfäden spezifisch auf Forschungsinteressen abgestellt werden. Im Unterricht geht es dem Lehrer nicht um die Erhebung von Präkonzepten, sondern um die Vermittlung von Wissensstrukturen.

Neben der "in vivo" Methode der Protokollierung laufenden Unterrichts kann auf direkte, "harte" Erhebungsverfahren nicht verzichtet werden. Die von uns verwendeten klassischen Testinstrumente werden unter Punkt B.2.2 beschrieben.

B.2.2

Fragebogenerhebungen

In die empirische Basis gehen die Ergebnisse zweier größerer schriftlicher Erhebungen ein. Die erste wurde durchgeführt in den Jahrgangsstufen 11 und 12 zu Beginn des Schuljahres 1983/84 über allgemeine Schülervorstellungen vom Wesen der Wissenschaft Physik und über die Interessenstruktur im Themenbereich Mechanik. Befragung 2 erhob nach Abschluß der Mechanikkurse im gleichen Schuljahr das Verständnis zentraler Begriffe sowie Schülermeinungen zum Sinn bestimmter methodischer Aspekte physikalischer Erkenntnisgewinnung. Zu beiden schriftlichen Erhebungen liegen Auswertungsberichte vor (Schecker 1983 , Schecker 1984). Unter Punkt B.2.2 werden die Erhebungsinstrumente vorgestellt sowie Stichproben und Auswertungsverfahren angegeben. Die Ergebnisse der schriftlichen Befragungen werden später in die Entwicklung und Diskussion des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik eingehen.

B.2.2.1 Befragung 1: Vorstellungen über die Wissenschaft Physik
und Interessenstruktur im Themenbereich Mechanik

Erhebungsinstrument:

Der verwendete viersellige Fragebogen hat zwei vorstellungsbezogene Abschnitte (Teile A und C) und einen interessenbezogenen Abschnitt (Teil B). Die Bearbeitung von Teil C erfordert von den Schülern eigenständige Antwortformulierungen. Die übrigen Teile sind im Multiple choice-Verfahren zu bearbeiten. Auf dem Deckblatt sollen Jahrgangsstufe, Kursart und Geschlecht angegeben werden. Der Fragebogen ist anonym. Die Verwendung der Daten zu reinen Forschungszwecken wird zugesichert.

Teil B: Interessenstruktur im Themenbereich Mechanik (ITM)

Teil B des Fragebogens beinhaltet eine Liste von 71 möglichen Tätigkeiten in einem Mechanikkurs der Sekundarstufe II (siehe folgende Seite). Die Items sollen von den Schüler auf einer Skala von 1 ("das würde ich besonders gerne tun") bis 5 ("dazu hätte ich überhaupt keine Lust") bewertet werden. Die Erhebung orientiert sich an der von Todt (1978) entwickelten Methode der differentiellen Interessentests. Jedes Item (z.B. Nr. 40: "Mit Lichtschranken experimentieren") besteht aus einem Gegenstand oder Thema (Lichtschranken) und einer Handlungsform (experimentieren). Bei der Konstruktion des Tests wurden die Gegenstandsbereiche (z.B. Raumfahrtthemen, Auto- und Verkehrstechnik, Geschichte der Physik) mit verschiedenen Gruppen von Handlungsformen kombiniert (z.B. berechnen/theoretisch herleiten oder Vortrag verfolgen/Film angucken). Zu jedem

- 1) Den Wert für die Erdbeschleunigung experimentell genau bestimmen.
- 2) Die Kräfte berechnen, die auf einen Formel-1 Piloten beim Start wirken.
- 3) Phänomene, die in der Natur vorkommen, untersuchen.
- 4) Diskutieren, unter welchen Aspekten die Physik die Natur betrachtet.
- 5) Das Zustandekommen der Schwerelosigkeit erklären.
- 6) Die Leistungsdaten eines Automotors berechnen.
- 7) Den Unterschied zwischen Masse und Gewicht erfahren.
- 8) Den Fahrwiderstand eines Experimentierwagens auf verschiedenen Untergründen experimentell bestimmen.
- 9) Die Gesetze zur Erklärung der Planetenbewegung lernen.
- 10) Einen Text zum Zusammenhang zwischen Gesellschaftsentwicklung und Entwicklung der physikalischen Theorie besprechen.
- 11) Die Kraft messen, mit der ein VW Käfer gezogen werden kann.
- 12) Ein Kurzreferat zur Entstehung der Gezeiten (Ebbe-Flut) halten.
- 13) Einen Lehrervortrag zu den Forschungsmethoden der Physik anhören.
- 14) Sportliche Leistungen unter physikalischen Gesichtspunkten analysieren.
- 15) Eine Versuchsanordnung selbst entwerfen und zusammenbauen.
- 16) Erfahren, wo man sich im Alltag überall Reibungseffekte zunutze macht.
- 17) Das eigene Körpergewicht berechnen, das eine Waage auf dem Mond anzeigen würde.
- 18) Einen Auszug aus einer Originalarbeit von Isaac Newton lesen.
- 19) Technische Gegenstände untersuchen.
- 20) Die Formel für die Zentrifugalkraft theoretisch herleiten.
- 21) Themen, die mit Raumfahrt zu tun haben, besprechen.
- 22) Einen Film anschauen, der die Zusammenhänge zwischen der Gesellschaftsentwicklung und der Entwicklung der physikalischen Theorie erläutert.
- 23) Die Abhängigkeit der Fallzeit eines Körpers von seiner Form experimentell untersuchen.
- 24) Die Durchschnittsgeschwindigkeit eines Tennisballs experimentell bestimmen.
- 25) Die Energieübertragung beim Zusammenstoß zweier Experimentierwagen untersuchen.
- 26) Die Entstehung der Jahreszeiten erläutert bekommen.
- 27) Erläutert bekommen, nach welchen Kriterien man einen Sicherheitsgurt konstruiert.
- 28) Die Methodik der Physik kennenlernen.
- 29) Versuche selbst ausdenken.
- 30) Überlegen, aus welchen physikalischen Gründen 100m-Läufer Tiefstarts machen.
- 31) Mechanische Begriffe und Gesetze lernen.
- 32) Überlegen, was passiert, wenn eine Bewegung wirklich vollkommen reibungsfrei ist.
- 33) Die Geschwindigkeit vorbeifahrender Autos messen.
- 34) Die Geschwindigkeit theoretisch herleiten, die ein Raumschiff braucht, um dem Schwerefeld der Erde zu entfliehen.
- 35) Ein Kurzreferat über die in einem Prospekt angegebenen Leistungsdaten eines Automotors halten.
- 36) Mechanische Experimente in Gruppenarbeit durchführen.
- 37) Die Bedeutung der Mechanik für die Entwicklung anderer physikalischer Theorien erläutert bekommen.
- 38) Forschungsmethoden der Physik selbst anwenden.
- 39) Die Entstehung der Passatwinde besprechen.
- 40) Mit Lichtschranken experimentieren.
- 41) Die physikalischen Grundlagen der Kreiselpumpe erarbeiten.
- 42) Eine Fragestellung aus dem Gebiet der Mechanik selbst ausdenken und verfolgen.
- 43) Die Bauweise einer Knautschzone erklären.
- 44) Einen Vortrag zur Entstehung der Gezeiten (Ebbe-Flut) verfolgen.
- 45) Einen Zeitschriftenartikel über die Arbeitsweise eines Raketenmotors lesen.
- 46) Phänomene untersuchen, bei denen Reibung eine wichtige Rolle spielt.
- 47) Die Ursprünge der Theorie der Mechanik kennenlernen.
- 48) Überlegen, warum ein Rasensprenger sich von alleine dreht.
- 49) Eine Modellachterbahn berechnen und bauen.
- 50) Den optimalen Abstoßwinkel beim Kugelstoß berechnen.
- 51) Einen Film über die Planetenbewegung anschauen.
- 52) Den Unterschied zwischen Masse und Gewicht erfahren.
- 53) Die geschichtliche Entwicklung der Physik kennenlernen.
- 54) Ein raffiniertes Demonstrationsexperiment vorgeführt bekommen.
- 55) Die Durchschnittsgeschwindigkeit eines Tischtennisballs berechnen.
- 56) Die Auswirkungen des Luftwiderstands eines PKW auf den Benzinverbrauch rechnerisch abschätzen.
- 57) Im Physikbuch das Kapitel zur Entstehung der Jahreszeiten durchlesen.
- 58) Die Leistungsgrenzen beim Stabhochsprung rechnerisch abschätzen.
- 59) Die Funktionsweise eines Fliehkraftreglers selbst herausfinden.
- 60) Die Verformung eines Körpers beim Aufprall auf eine Wand untersuchen.
- 61) Die Formel für die Frequenz einer Pendelschwingung aus Experimenten ableiten.
- 62) Die Laufzeit des Lichts von der Sonne zur Erde berechnen.
- 63) Eine selbstgewählte Fragestellung aus dem Gebiet der Mechanik experimentell bearbeiten.
- 64) Mit den gelernten Gesetzen Aufgaben lösen.
- 65) Die Umlaufbahn eines Satelliten berechnen.
- 66) Ein Kurzreferat über die Entstehung von Schwerelosigkeit halten.
- 67) Überlegen, wann physikalische Gesetze als bewiesen gelten.
- 68) Den besten Absprungwinkel beim Weitsprung selbst herleiten.
- 69) Die Fallzeiten unterschiedlich schwerer Körper im Treppenhaus messen.
- 70) Ein Mofagetriebe auseinanderbauen.
- 71) Einen Film anschauen, der die Planetenbewegung erläutert.

Themenbereich gibt es ein "moleares" Item (z.B. Nr. 21: "Themen, die mit Raumfahrt zu tun haben, besprechen"). Zugeordnet sind jeweils eine Reihe "molekularer" Items mit speziellen Themen (z.B. Nr. 45: "Einen Zeitschriftenartikel über die Arbeitsweise eines Raketenmotors lesen"). Manche Gegenstände sind mit verschiedenen Handlungsformen kombiniert, um zu sehen, ob bei der Bearbeitung des Tests eher die Themen ausschlaggebend sind oder die Behandlungsweisen.

Bei der Gestaltung der Items wurde großer Wert auf tatsächliche unterrichtliche Realisierbarkeit gelegt. In der Einleitung werden die Schüler angeregt, sich die Situation so vorzustellen, als ob sie bei der inhaltlichen Gestaltung eines Kurses mitbestimmen könnten, an dem sie anschließend selbst teilnehmen würden. Die potentielle Realisierbarkeit der Tätigkeiten soll die Praxis-Relevanz der Ergebnisse steigern.

Teile A und C: Vorstellungen über die Wissenschaft Physik (VWP)

Die Teile A und C des Fragebogens testen allgemeine Vorstellungen der Schüler über Gegenstände, Ziele und Methoden der Physik. Der Schwerpunkt liegt auf dem Zusammenhang von Physik und Alltag. In Teil C werden in Form eines fiktiven Gesprächs zweier Schüler mögliche Gesichtspunkte zur Bewertung dieses Zusammenhangs vorgestellt.

Jens vertritt folgenden Standpunkt:

- Physik nützt im Alltag nicht viel
- Physik beschäftigt sich mit einer abgehobenen Laborwelt
- Die Alltagsphänomene sind zu komplex, als daß man sie mit physikalischen Gesetzen genau beschreiben könnte.

Ralf entgegnet:

- Man hat die Physik erfolgreich für bestimmte Phänomene genutzt (Gezeiten, Flugbahn von Raketen)
- Die Physik sucht nach allgemeinen Gesetzen, an der Beschreibung spezieller Alltagsphänomene ist sie nicht interessiert
- Physik hilft beim Verstehen der Umwelt.

Die Aufforderung an die Schüler lautet, ihre Ansicht zu dem "angesprochenen Problemkreis" zu äußern. Die Präsentation der Fragestellung durch ein fiktives Gespräch soll Argumente bereitstellen, ohne in eine bestimmte Antwortrichtung zu lenken.

Teil A umfaßt 8 Aussagen über Gegenstände, Ziele und Methoden der Physik. Die fünfstufige Bewertungsskala reicht von "stimmt genau" (1) bis "stimmt überhaupt nicht" (5).

- A1) Die Tätigkeit des Physikers besteht darin, Vorgänge, denen wir im Alltag begegnen, systematischer, genauer und gezielter zu untersuchen, als der "Alltagsmensch" das kann.
- A2) Die Physik hat immer wieder experimentelle und mathematische Tricks auf Lager, auf die ein "normaler" Mensch nie kommen würde.
- A3) Physikalische Erkenntnisse werden aus Experimenten gewonnen. Theorien lassen sich aus den Ergebnissen von Experimenten herausfiltern. Experimente entscheiden über den Bestand von Theorien.
- A4) Die Physik beschäftigt sich mit einer eigenen, idealisierten Laborwelt, die sich von der Alltagswelt prinzipiell unterscheidet.
- A5) Die Physik hat das Bestreben, allgemeine Gesetzmäßigkeiten aufzustellen. An speziellen Aussagen über konkrete Vorgänge ist sie wenig interessiert.
- A6) Die Erkenntnisgewinnung in der Physik wird in erster Linie durch die logischen Überlegungen und die Eingebungskraft der Physiker vorangetrieben. Experimente dienen der Bestätigung von Theorien, die durch theoretische Spekulation gewonnen wurden.
- A7) Die Physik zeichnet sich gegenüber anderen Wissenschaften (z.B. der Rechtswissenschaft) dadurch aus, daß man ohne lange Diskussionen eindeutig entscheiden kann, ob eine Theorie richtig oder falsch ist.
- A8) Die Probleme, die manchmal im Physikunterricht auftreten (nicht funktionierende Experimente, ungenaue Meßwerte, Vieldeutigkeit von Meßergebnissen), kommen in der Forschungsphysik viel seltener vor.

Die Aussagen 1, 4 und 5 sprechen den gleichen Problemkreis an wie Teil C (Gegenstände und Ziele). Die Aussagen 3 und 6 betreffen den Methodenaspekt. Item 3 läßt sich als "naiv-empiristischer" Standpunkt umschreiben. Item 6 betont die Bedeutung von kreativem Denken und von Spekulationen bei der Erkenntnisgewinnung und geht somit über einen "deduktiven" Standpunkt hinaus. Die Aussagen 7 und 8 sprechen das Thema der Exaktheit und Eindeutigkeit der Physik an. Aussage 2 bezieht sich auf die Verstehbarkeit der Physik (das Item beruht auf einem Schülerzitat). Unseren eigenen Standpunkt zur Frage der Gegenstände, Ziele und Methoden der Physik haben wir unter Punkt A.3.2 dargestellt.

Stichprobe

Die Erhebung wurde im August/September 1983 in Physikkursen an gymnasialen Oberstufen in Bremen und Niedersachsen durchgeführt. 449 Schüler wurden in die Endauswertung einbezogen. In der Mehrzahl der Kurse wurde der Fragebogen vom Verfasser verteilt. In den anderen Fällen übernahmen die Fachlehrer die Durchführung. Die Bearbeitung nahm im Schnitt 35 Minuten in Anspruch.

Im einzelnen wurde erfaßt:

- 9 Leistungskurse (6 elfte, 3 zwölfte Klassen) mit 145 Schülern
- 18 Grund- und Einführungskurse (14 elfte, 4 zwölfte Klassen) mit 304 Schülern.

Auswertungsverfahren

Alle Schülerantworten auf Teil C des Fragebogens, die sich nicht auf einfache Zustimmung zu "Ralf" oder "Jens" beschränkten, wurden einzeln aufgelistet. Aus der Durchsicht einer Teilmenge der Aussagen wurden zentrale, wiederkehrende Antwortelemente herausgearbeitet und zu inhaltlichen Kategorien erhoben. Anschließend wurde die Antreffhäufigkeit der Kategorien in der Gesamtmenge der Antworten ausgezählt. Die so gewonnenen Prozentwerte beziehen sich nicht auf die gesamte Schülerzahl, sondern auf die Anzahl der Schüler, die eigene Stellungnahmen in Teil C abgegeben haben. Da keine Musterantworten vorgegeben waren, darf man, um ein Beispiel zu nennen, aus dem Ergebnis, daß 4% der Schüler meinen, Physik sei auch ohne Alltagsbezug interessant, nicht schließen, daß 96% gegenteiliger Meinung seien. Über die 96% kann man schlicht keine Aussage treffen. Die Prozentangaben zeigen vornehmlich, welche Gesichtspunkte den Schülern im Problemkreis Alltagsbezug der Physik mehr und welche weniger einfallen.

Die in den Teilen A und B des Fragebogens erhobenen Daten wurden mit Hilfe des Programmpakets SPSS ausgewertet (Statistical Package for the Social Sciences). Auf die Standardverfahren der Ermittlung von Häufigkeitsverteilungen, Kreuztabellierungen und Korrelationsanalysen gehen wir nicht ein. Zur Methode der Faktorenanalyse sind einige Erläuterungen notwendig.

Die Daten von Interessentests des von uns verwendeten Typs werden als intervallskaliert angenommen. Die 71 Items des Tests ITM konnten daher einer Hauptkomponentenanalyse nach der Methode Varimax unterworfen werden (orthogonale Rotation mit dem Ziel der Vereinfachung der Spalten der Faktorenmatrix). Beim Vorliegen der Faktorenstruktur ist zunächst die Anzahl der zur Interpretation heranziehbaren Faktoren zu bestimmen. Bei einer Komponentenanalyse tritt das Problem der "Hybrid-Faktoren" auf: Faktoren niederen Ranges besitzen einen zunehmenden Anteil von spezifischer Varianz, d.h. von Varianz, die eigentlich zufälliger Art ist und nicht auf gemeinsame Varianz zurückgeführt werden kann. Das resultiert daraus, daß die Hauptkomponentenanalyse im Gegensatz zur Hauptfaktorenanalyse voraussetzt, daß die Itemvektoren vollständig aus den Faktorenvektoren zusammengesetzt werden können. Als Kriterium für signifikante Faktoren kann bei Itemzahlen über 50 nicht das Kaiser-Kriterium (Eigenwert > 1) genommen werden, da dann zu viele Faktoren gezogen würden. Als Ausweg bietet sich der auf Cattell zurückgehende "Scree-Test" an (vgl. Child 1970, 43f). Hier werden in einem Diagramm die Eigenwerte über den Faktoren aufgetragen. Der so entstehende Graph geht von einem Hyperbel-

Verlauf über in eine Gerade. Dabei tritt ein charakteristischer "Huckel" ca. 3 Faktoren vor Beginn der Geraden auf. An diesem Punkt, an dem der Graph in eine Gerade übergeht, wird die Faktorenzziehung abgebrochen. Die nachfolgenden Faktoren stellen nach Cattell das "Faktorengeröll" ("Scree") dar, in dem die zufällige Varianz einen zu hohen Anteil hat. Für die Hauptkomponentenanalyse des Tests ITM ergaben sich nach diesem Kriterium neun zu ziehende Faktoren. Damit werden 47,4% der Gesamtvarianz erfaßt.

Die Signifikanzschwelle für die Faktorenladungen (L) wurde nach der Burt-Banks-Formel zu $|L| \geq 0,17$ berechnet. Die Burt-Banks-Formel (vgl. Child 1970, 46) geht vom Signifikanzmaß für entsprechende Produkt-Moment-Korrelationen aus und korrigiert dieses anhand der Faktorennummer. Dahinter steckt der Gedanke, daß mit der Faktorennummer die Signifikanzschwelle steigen muß, da der Anteil der spezifischen Varianz bei nachgeordneten Faktoren zunimmt. Um eine übersichtliche Faktorenmatrix zu erhalten, haben wir die Signifikanzschwelle bei $|L| \geq 0,20$ gesetzt.

Ein Faktor wird geformt durch hohe Interkorrelationen der Bewertungen einer Untermenge von Items. Die Faktorenmatrix muß inhaltlich interpretiert werden. Es muß geklärt werden, ob die auf einen Faktor signifikant ladenden Items in einem Zusammenhang stehen. Die Items, die einen Faktor bilden, unterliegen einer gleichartigen Einschätzung durch die Schüler. Hält ein Schüler das i-te Item $I_{ij}(i=1,2,3,\dots,n)$ eines Faktors j für interessant, so wird er die n - 1 restlichen Items desselben Faktors j tendenziell ebenfalls als interessant ansehen. Dasselbe gilt aber auch gegengleich für negative Einschätzungen. Daher können aus der Faktorenanalyse keine direkten Schlüsse auf die Beliebtheit der Faktoren gezogen werden.

Um die Beliebtheit der Faktoren schätzen zu können, wurden Mittelwerte der auf einen Faktor mit $L > +0,2$ ladenden Items nach zwei Methoden berechnet:

1. Arithmetisches Mittel

$$\overline{BI}_j = 1/n \sum BI_{ij}$$

2. Gewogenes Mittel

$$\overline{BI}^*_j = 1/n \sum (L_{ij} \cdot BI_{ij})$$

$\overline{BI}_j$: mittlere Bewertung des Faktors j ; j = 2,3,4,5,7,8

$\overline{BI}^*_j$: gewogene mittlere Bewertung des Faktors j

L_{ij} : Faktorenladung des i-ten Items im Faktor j ; i = 1,2,3,...,n

BI_{ij} : Bewertung des i-ten Items im Faktor j

Die Werte wurden nur für die Faktoren berechnet, die sich inhaltlich eindeutig interpretieren lassen. Während das arithmetische Mittel einfach den Durchschnittswert der Interessantheits-Bewertungen der n auf einen Faktor ladenden Items darstellt und so direkt auf der Skala von 1 ("Das würde ich besonders gerne tun") bis 5 ("dazu hätte ich überhaupt keine Lust") eingeordnet werden kann, berücksichtigt das gewogene Mittel die Ladung jedes in die Berechnung einbezogenen Items auf den Faktor. Dadurch gehen in $\overline{BI}^*$ besonders die Items ein, die eine hohe Faktorenladung haben und demnach die Kernitems des Faktors darstellen. Der Wert $\overline{BI}^*$ hat jedoch keine anschauliche Bedeutung mehr als Interessenindex auf der Skala von 1 bis 5. Mit Hilfe von $\overline{BI}^*$ können jedoch aussagekräftige Rangfolgen in der Beliebtheit der Faktoren aufgestellt werden.

B.2.2.2 Befragung 2: Präkonzepte zu zentralen Begriffen der Newtonschen Mechanik, Assoziationen und Vorstellungen zur Methodik der Physik

Erhebungsinstrumente

Verwendet wurde ein sechsseitiger Fragebogen mit

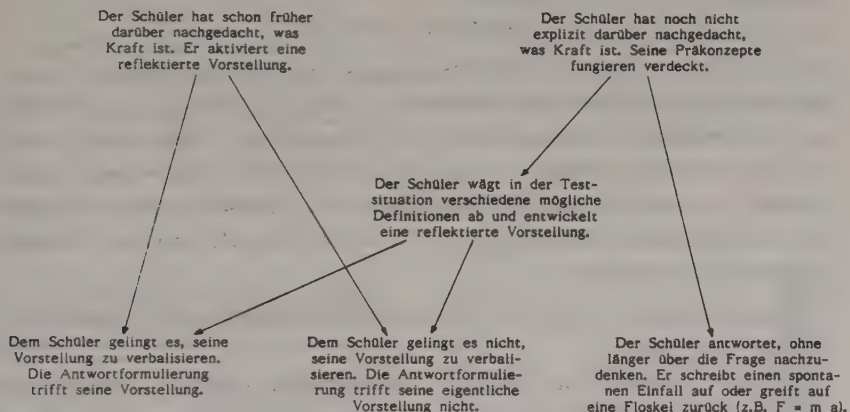
- einem freien Definitionstest zum Begriff "Kraft" (Test DTK)
- 7 Denkaufgaben zur Mechanik (Test DAM)
- 2 offenen Fragen zur Methodik der Physik (Test MdP)

Dazu kamen auf gesonderten Blättern zwei freie Assoziationstests zu den Stichworten "Bewegung" und "Kraft" (ATB und ATK).

Definitions- und Assoziationstests (DTK, ATB, ATK)

Die Definitions- und Assoziationstests orientieren sich an einem Muster von Schaefer (1980). Die Assoziationstests wurden vor der Verteilung des Hauptfragebogens durchgeführt. Die Schüler erhielten ein Blatt mit dem Text: "Was fällt Ihnen spontan, ohne Nachdenken, zum Stichwort _____ ein?" Der Untersuchungsleiter erklärte den Schülern, daß sie zu einem bestimmten Stichwort alles das aufschreiben sollten, was ihnen dazu spontan einfiele - unabhängig davon, ob es ihrer Meinung nach etwas mit Physik zu tun habe oder nicht. Danach wurde das erste Stichwort ("Bewegung") genannt und an die Tafel geschrieben (Test ATB). Nach maximal einer Minute wurden die Zettel wieder eingesammelt. Die Schüler hatten dann zumeist keine spontanen Einfälle mehr und begannen mit konzentriertem Nachdenken. Anschließend wurden neue Blätter für das zweite Stichwort ("Kraft") ausgegeben (Test ATK).

Der Hauptfragebogen stellt im ersten Punkt (Test DTK) die Frage: "Was ist Kraft? Denken Sie sorgfältig nach und beschreiben Sie den Begriff präzise, aber kurz! (Nach einer Gleichung ist nicht gefragt.)" Die Aufforderung zu einer freien Definition von Kraft kann sehr unterschiedliche Beantwortungsweisen hervorrufen. Das folgende Schema beschreibt einige mögliche Wege, auf denen die Antworten zustandekommen können.



Zum Zustandekommen von Antworten auf die Frage "Was ist Kraft?"

Das Schema soll verdeutlichen, daß von einer vorgefundenen Antwortformulierung nicht mit Sicherheit auf das Vorhandensein einer entsprechenden Vorstellung geschlossen werden kann. Weiterhin muß offenbleiben, ob eine Antwort auf einer gefestigten Vorstellung beruht oder ob sie spontan in der Testsituation entwickelt wurde. Dennoch lassen sich aus den Schülerdefinitionen wertvolle Schlüsse ziehen. Sprachliche Umschreibungen physikalischer Begriffe sind schwierig - schwieriger als das Memorieren von formalen Definitionen oder von Gesetzen. Aus dem Antwortverhalten läßt sich also zunächst ablesen, in welchem Maße die Schüler überhaupt eigene Beschreibungen des Begriffs Kraft versuchen, die über Floskeln wie "Kraft ist Masse mal Beschleunigung" hinausgehen.

Auch Formulierungen, die spontan in der Situation entwickelt werden, geben Aufschluß über Präkonzepte zu Kraft. Die Definitionen beruhen ebenso wie die Assoziationen auf Elementen der individuellen Vorverständnisse. Ermittelt man

die Verteilung der verwendeten Definitionsbestandteile, so erhält man einen Eindruck über diejenigen Assoziationen, die von den Schülern für wertgehalten werden, in eine physikalische Definition von Kraft einzugehen.

Beim Nachdenkprozeß (werden) viele der bisherigen Assoziationen ausgefiltert. Es bleiben nur noch solche übrig oder werden neu hinzugenommen, die nach Meinung des Schülers den wissenschaftlichen (logischen) Kern der Sache betreffen.
(Schaefer 1980, 6)

Denkaufgaben (Test DAM)

Die Abschnitte B und C des Hauptfragebogens enthalten Denkaufgaben zu den Begriffen Kraft, Beschleunigung und Trägheit, sowie zur Kinematik von Bewegungen in mitbewegten Bezugssystemen. Die Bezeichnung "Denkaufgabe" wurde zur Unterscheidung von "Rechenaufgabe" gewählt. Keines der gestellten Probleme erfordert zu seiner Lösung Formelkenntnisse oder Rechnungen. Dagegen bedarf es eines profunden Verständnisses der genannten Begriffe und der folgenden grundlegenden Denkmuster:

- Die resultierende Kraft wirkt in Richtung der Bewegungsänderung (Beschleunigung) eines Körpers.
- Bei einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit bedarf es keiner resultierenden Kraft in Bewegungsrichtung. (Wohl aber können Einzelkräfte in dieser Richtung auftreten.)
- Ein Körper wird nur so lange beschleunigt, wie eine resultierende Kraft auf ihn einwirkt.
- Trägheit und Reibungskraft sind zwei voneinander zu trennende Faktoren. Mit der Verminderung von Reibungskräften vermindert sich nicht die an die Masse gebundene Trägheit eines Körpers.

Aufgabe B1

Aufgabe B1 geht auf eine Untersuchung von Warren (1979) zurück. In der vorliegenden Fassung wurde das Wort "Kräfte" durch Unterstreichen hervorgehoben, um zu betonen, daß keine Geschwindigkeits- oder sonstigen Pfeile eingetragen werden sollen. Außerdem werden die Schüler aufgefordert, ihre Pfeile mit Bezeichnungen zu versehen. Daraus sollen Informationen über den Charakter der jeweiligen Kraft gewonnen werden. Vollständig richtige Antwort wäre bei A ein Kraftpfeil senkrecht nach unten (Gravitationskraft) und bei B eine deutlich

mals - mit dem gleichen Ergebnis. Nach ihrer festen Erwartung, die sie dem Untersuchenden gegenüber äußerten, hätte der Wagen nach dem Anstoßen noch eine gewisse Zeit lang schneller werden müssen, bevor er durch den Sand gebremst würde. Die Vorstellung, daß ein Körper aus sich selbst heraus beschleunigen kann, soll durch Aufgabe B2 erkundet werden. Der Graph im v-t-Diagramm müßte dann deutlich über t_1 hinaus ansteigen. Weitere Auswertungsgesichtspunkte:

- Nehmen die Schüler bei t_5 einen Vorzeichenwechsel der Geschwindigkeit vor?
- Sehen die Schüler die Bewegung unter Reibungseinfluß? (Allmähliche Abnahme des Betrages von v nach Erreichen seines Maximalwertes.)

Aufgabe B3

Die Aufgaben B3 und B6 untersuchen eine Verkopplung von Reibung und Trägheit. Aufgabe B3 ist als Gedankenversuch entworfen. Item B3a fragt direkt nach einer Verkopplung von herabgesetzter Reibung mit verminderter Trägheit. Schülern, die Item B3b für eine korrekte Aussage halten, kann man zumindest unterstellen, daß sie die Bedeutung der trägen Masse für die Beschleunigung eines Körpers im Vergleich zur Reibung unterschätzen. (Eine Überschlagsrechnung ergibt bei einer Kraft von 100N einen Beschleunigungszeitraum von rund 5 Minuten). Im Extremfall lautet das Präkonzept: "Bei völligem Wegfall von Rei-

Stellen Sie sich den folgenden Gedankenversuch vor:
Ein vollbeladener Eisenbahnwaggon (Gewicht ca. 10t) wird auf eine riesige Luftkissenfahrbahn gestellt. Die Reibung wird dadurch praktisch aufgehoben. Die folgenden Aussagen sind auf diesen Gedankenversuch bezogen. Bewerten Sie sie als richtig oder als falsch:

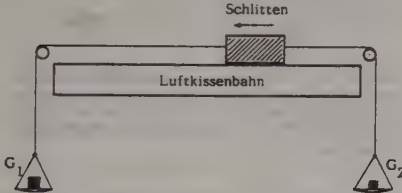
- a) Durch die Versuchsanordnung wird die Trägheit des Waggons vermindert.
 - b) Man könnte den Waggon auf eine Geschwindigkeit von 10km/h bringen, indem man ihn kurz mit dem kleinen Finger anschubst.
 - c) Durch die Versuchsanordnung wird der Widerstand des Waggons gegen eine Beschleunigung herabgesetzt.
- big großer Masse beliebig leicht beschleunigen." Item B3c faßt mit "Widerstand gegen eine Beschleunigung" Trägheit und Reibung in einem Konzept zusammen. Die Aussage läßt sich auch trivial formulieren: "Der Waggon läßt sich jetzt leichter beschleunigen."

Aufgabe B4

Aufgabe B4 wurde mit einigen Modifikationen von Jung (1981a) übernommen. Die Veränderungen liegen in einer stärkeren Betonung der Reibungsfreiheit, im Verzicht auf die Vorgabe von Auswahlantworten und in der Formulierung zweier Itemvarianten. In einer Version spricht der Text davon, die Gewichte lägen in "Waagschalen", in der anderen sind sie an Haken befestigt. Die Haken-Version

soll einer eventuellen Gleichsetzung der Anordnung mit einer Waage entgegenwirken, die zu falschen Lösungsansätzen verleitet. Die Aufgabe testet das Vorliegen eines Kraft - Beschleunigungs- oder eines Kraft - Bewegungsdenkens.

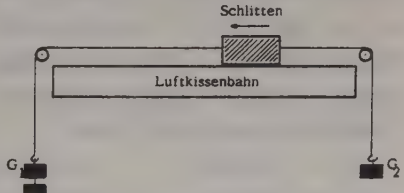
Ein auf einer Luftkissenfahrbahn reibungsfrei gleitender Schlitten wird von zwei entgegengesetzt gerichteten Kräften beeinflusst. Die Kräfte werden durch Gewichtsstücke hervorgerufen, die auf Waagschalen liegen:



Zuerst soll das Gewicht G_1 auf der linken Seite doppelt so groß sein wie das Gewicht G_2 auf der rechten Seite. Das Fahrzeug fährt nach links. Plötzlich wird während dieser Bewegung G_2 gleich G_1 gemacht, indem einige Gewichtsstücke in die rechte Waagschale zugelegt werden.

Was geschieht nun?

Ein auf einer Luftkissenfahrbahn reibungsfrei gleitender Schlitten wird von zwei entgegengesetzt gerichteten Kräften beeinflusst. Die Kräfte werden durch Gewichtsstücke hervorgerufen, die über Fäden am Schlitten befestigt sind:



Zuerst soll das Gewicht G_1 auf der linken Seite doppelt so groß sein wie das Gewicht G_2 auf der rechten Seite. Der Schlitten fährt nach links. Plötzlich wird während dieser Bewegung G_2 gleich G_1 gemacht, indem ein Gewichtsstück auf der rechten Seite dazugehängt wird.

Was geschieht nun?

Aufgabe B5

Aufgabe B5 soll erkunden, welche Typen von Ursachen die Schüler angeben. Versuchen sie eine physikalische Beschreibung (z.B. über die Zentrifugalkraft), nennen sie technische Gründe (z.B. Versagen der Lenkung) oder sprechen sie von menschlichem Versagen? Nicht untersucht werden soll die Richtigkeit etwaiger physikalischer Argumentationen.



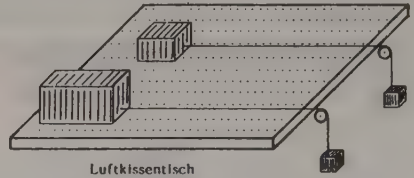
Ein PKW rutscht beim Durchfahren einer Kurve von der Fahrbahn.

Diskutieren Sie mögliche Ursachen dieses Vorgangs!

Aufgabe B6

Aufgabe B6 spricht den gleichen Problemkreis an wie B3. Im Aufgabentext wird nicht gesagt, daß durch das Einschalten des Gebläses die Reibung aufgehoben wird. Man kann davon ausgehen, daß die Schüler diesen Schluß selbst ziehen. Schüler, die in der bei Item B3 beschriebenen Weise Trägheit an Reibung koppeln, müßten antworten: "Beide Holzklötze werden gleich stark beschleunigt."

Auf einem Luftkissentisch liegen nebeneinander ein kleiner und ein großer Holzklötz. Über Umlenkrollen sind an ihnen zwei gleich schwere Gewichte befestigt:



Zunächst wird das Gebläse des Luftkissentischs nicht eingeschaltet. Der große Holzklötz wird langsamer beschleunigt als der kleine. In einem zweiten Versuch wird das Gebläse des Luftkissentischs eingeschaltet. Was geschieht jetzt?

Aufgabe C

Aufgabe C stellt zwei Aussagen zum Zusammenhang von Kraft und Bewegung zur Diskussion, die auf Aristoteles und Newton zurückgehen. Aussage I ist angelehnt an ein Zitat von Aristoteles aus der 'Mechanik' (nach Berger 1981, 17). Aussage II stammt nahezu wörtlich aus den 'Principia' (Erstes Gesetz).

Lesen Sie die beiden folgenden Aussagen zur Bewegungslehre durch:

- I "Ein in Bewegung befindlicher Körper kommt zum Stillstand, sobald die Kraft, die ihn vorantreibt, nicht mehr in der für den Antrieb erforderlichen Weise wirken kann."
- II "Jeder Körper behält eine ihm einmal verliehene Geschwindigkeit, solange er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Bewegungszustand zu ändern."

a) Stellen Sie den prinzipiellen Unterschied zwischen den beiden Aussagen heraus! Verdeutlichen Sie durch Beispiele!

b) Welche Konsequenzen haben diese Aussagen für den folgenden Versuch:

Bei einem fahrenden Schiff wird ein Stein von der Mastspitze fallengelassen.

Wo landet der Stein nach Theorie I und wo nach Theorie II?

c) Wo würde der Stein in dem oben genannten Versuch tatsächlich auftreffen?



(Wenn Sie wollen, können Sie die Landestelle in der Zeichnung eintragen)

Die Idee hinter der Aufgabenstellung ist, daß Schüler den Newtonschen Kraftbegriff dann tatsächlich verarbeitet haben, wenn sie ihn bewußt von aristotelischen oder von Impetusvorstellungen abgrenzen können. (Diese stehen dem lebensweltlichen Kraftverständnis näher als das Newtonsche Konzept. Sie sind jedoch beide theoretische Konzeptionen und daher nicht einfach mit einem

lebensweltlichen Verständnis gleichzusetzen.) Die Stellungnahmen zu den beiden "Aussagen zur Bewegungslehre" sollen Indizien über den Grad der bewußten Unterscheidungsfähigkeit liefern. Aufgabe C kann auch Aufschluß darüber geben, welches Konzept die Schüler für wichtiger, realitätsnäher oder sinnvoller halten.

Der unter Punkt Ca herauszuarbeitende prinzipielle Unterschied besteht darin, daß Newton jede Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers auf das Wirken von Kräften zurückführt, so daß Reibungswiderstände als Kräfte zu konzeptualisieren und gleichberechtigt neben Antriebskräfte zu stellen sind. Aristoteles dagegen sieht als Kräfte nur die für den Antrieb verantwortlichen Einwirkungen.

Die Aussagen I und II führen unter bestimmten Randbedingungen zu unterschiedlichen Voraussagen über das Verhalten von Körpern. Galilei zieht im 'Dialog über die Weltsysteme' das Beispiel eines von der Mastspitze eines fahrenden Schiffes fallenden Steines heran, um die Möglichkeit der Erddrehung herauszustellen. Nach Aristoteles müßte der Stein nach Wegfall des Kontakts mit dem Bewegten Mast im ruhenden Bezugssystem senkrecht herunterfallen und damit je nach Geschwindigkeit des Schiffes mehr oder weniger weit in Richtung Heck niederkommen. Nach Aussage II würde der Stein am Fußpunkt des Mastes auftreffen, eventuell durch Einwirkung von Lufttreibungskräften leicht davon entfernt. Die Aufgabe testet die Fähigkeit zur Beschreibung des Verhaltens von fallenden Körpern in mitbewegten Bezugssystemen, bzw. zur Anwendung des Trägheitsprinzips.

Fragen zur Methodik der Physik (Test MdP)

In den Abschnitten D und E des Fragebogens werden zwei Aspekte der Methodik physikalischer Erkenntnisgewinnung zur Diskussion gestellt. Zum einen geht es um das Arbeiten mit Gedankenexperimenten und Idealisierungen, zum anderen um die Verwendung einer Fachsprache mit definierten Begriffen.

Schüler verwenden im Unterricht die Ausdrücke Kraft, Energie, Schwung, usw. häufig synonym. Steht dahinter die Meinung, eine scharfe Trennung, wie sie von der Physik vorgenommen wird, sei übertrieben? Dem soll in Frage E nachgegangen werden.

Frage E: Die Physik trennt scharf zwischen den Begriffen Kraft, Energie und Impuls. Halten Sie die Unterscheidungen für notwendig oder für eine unnötige Verkomplizierung ähnlicher Dinge? Begründen Sie Ihre Antwort!

Bei der Analyse von Unterrichtsprotokollen trifft man auf einen direkt oder

unterschwellig geäußerten Standpunkt von Schülern, spekulative Gedankenexperimente mit in der Anfaß- und Vorzeigerealität nicht zu verwirklichenden Annahmen machten keinen Sinn, "weil es so etwas auf der Erde nicht gibt". Frage D soll testen, inwieweit der Physikunterricht die erkenntnisleitende Bedeutung "reiner Phänomene" einsichtig machen konnte.

Frage D: Im Physikunterricht wird oft mit Annahmen und Gedankenexperimenten gearbeitet, die augenscheinlich nicht realisierbar sind (z.B. Ausschluß des Luftwiderstands und anderer Reibungseffekte oder Annahme einer unendlich lange andauernden geradlinigen Bewegung). Halten Sie diese Vorgehensweise für sinnvoll oder nicht sinnvoll? Begründen Sie Ihre Antwort!

Stichprobe

Die Befragung wurde im Februar/März 1984 in 15 Physikkursen der Jahrgangsstufe 11/2 an Bremer und niedersächsischen gymnasialen Oberstufen durchgeführt (insgesamt 254 Schüler). Darunter befanden sich sechs Leistungskurse (108 Schüler) sowie neun Grund- und Einführungskurse (146 Schüler). In den Kursen war die Behandlung der Newtonschen Dynamik entweder bereits abgeschlossen oder stand kurz vor dem Abschluß (Rotationsbewegungen). Der Assoziationstest wurde mit 132 Schülern in neun der fünfzehn Kurse durchgeführt (etwa gleich viele Leistungskurs- wie Grundkursschüler). Die Gesamtbearbeitungsdauer betrug ca. 40 Minuten.

Auswertungsverfahren

Die Daten der Tests DAM und MdP wurden abgelocht und, gestützt auf das Programmpaket SPSS, statistisch ausgewertet (Häufigkeitsverteilungen, Korrelationsanalysen, Kreuztabellierungen). Ausführliche Antworten in den Tests DTK, MdP und DAM (Aufgabe C) wurden wörtlich herausgeschrieben. Die Assoziationen zu den Stichworten Kraft und Bewegung wurden ausgezählt. Aus einer Teilmenge der Definitionen von Kraft wurden Kategorien für die Antworten im Test DTK gewonnen und mit ihnen die Verteilung der Definitionselemente im Gesamtdatensatz ermittelt.

B.2.3 Zur Methodik der Konstruktion von Vorverständniselementen

Im Anschluß an die Vorstellung der Datenerhebungsverfahren soll an zwei Beispielen die Vorgehensweise bei der Postulierung und kritischen Überprüfung potentieller Vorverständniselemente aufgezeigt werden. Dazu wurde ein spezifisches Interesse ausgewählt, das letztlich nicht in das thematische Vorverständnis zur Mechanik aufgenommen wurde, und ein Präkonzept, das sich bewährt hat. Der Schwerpunkt der folgenden Ausführungen liegt nicht auf den Inhalten der Beispiele, sondern auf der daran exemplarisch beschriebenen Methodik der Datenanalyse und der Entwicklung von Vorverständniselementen.

Spezifisches Interesse an Reibungsphänomenen

Der erste Anstoß für die Postulierung eines Interesses an Reibungsphänomenen ergab sich aus der Beobachtung einer Schülergruppe in einer SVU-Phase. Die Gruppe hatte als Fragestellung formuliert: "Wie hängt die Beschleunigung eines Wagens von der Fahrbahn ab?" (Im Experiment wurde zur Simulation unterschiedlicher Fahrbahnbeschaffenheiten in die Führungsschiene einer Schwefelspurfahrbahn grob- und feinkörniger Sand gestreut.) Als ein methodisches Prinzip bei den empirischen Erhebungen galt, daß alle Ideen für mögliche fungierende Vorverständniselemente, die sich aus der Beobachtung von Schülerverhalten, beim Lesen von Wortprotokollen oder bei der Auswertung schriftlicher Tests ergaben, auf Karteikarten festgehalten und mit kurzen Erläuterungen versehen wurden. Die Hypothesen bildeten Anhaltspunkte dafür, worauf bei der Durchsicht weiteren Materials besonders zu achten war. Auf den Karteikarten wurden stichwortartig Belege gesammelt, d.h. Beschreibungen von Situationen, in denen die Annahme des Fungierens des Vorverständniselements das protokollierte Schülerverhalten erklären konnte. So fanden sich in Wortprotokollen mehrere Situationen, in denen Schüler von sich aus, häufig entgegen den Intentionen des Lehrers, bei behandelten Phänomenen auf die Einflüsse von Reibungseffekten eingingen. Mehrere Themenwahlen in SVUs ließen sich unter dem physikalischen Stichwort "(dissipative) Reibungskräfte" einordnen.

Gemäß unserer Definition von Interesse als "überdauernder Verhaltensdisposition, die sich in der besonderen Zuwendung zu bestimmten Tätigkeiten oder Inhalten äußert" (vgl. Punkt A.1.5) schien sich das Vorverständniselement zu bewähren. Um die Hypothese an einer größeren Population zu testen, wurden in den differentiellen Interessententest ITM (siehe Punkt B.2.2.1) sechs Items zum Inhaltsbereich "Reibungsphänomene" aufgenommen (I8, I16, I23, I32, I46, I56; z.B. I46: "Phäno-

mene untersuchen, bei denen Reibung eine wichtige Rolle spielt"). Die Beliebtheitsindizes dieser Items lagen nur im unteren Mittelfeld der Skala. Die Faktorenanalyse ergab keinen eindeutig als "Reibungsphänomene" interpretierbaren Faktor.

Damit zeigte sich eine Diskrepanz zwischen unserer Interpretation der Motive bestimmter beobachteter Verhaltensweisen und den Ergebnissen einer direkten Befragung. Die Abwägung, ob das postulierte spezifische Interesse in das thematische Vorverständnis zur Mechanik aufzunehmen war, wurde durch Gespräche mit Schülergruppen beeinflusst, die in SVU-Phasen Themen bearbeiteten, die physikalisch unter "Reibungsphänomene" einzuordnen waren (z.B. Untersuchung des Luftwiderstands unterschiedlich geformter Körper beim freien Fall). Die Schüler äußerten vorwiegend ein Interesse am jeweiligen Einzelthema mit seinen konkreten Experimentiermöglichkeiten und waren sich wenig darüber bewußt, daß als übergeordneter Gesichtspunkt Reibung im Spiel war. Den Ausschlag für die Nicht-Aufnahme des Elements ging schließlich davon aus, daß inzwischen zwei andere Vorverständniselemente vorlagen, unter die die gesammelten Beispiele für ein Interesse an Reibungsphänomenen subsumiert werden konnten und von denen eines darüberhinaus erklären konnte, warum es Schülern schwer fällt, in Gedankenexperimenten oder Aufgabenstellungen mit idealisierten Randannahmen vom Faktor Reibung abzusehen:

- Allgemeines Interesse an Phänomenen an sich (im Gegensatz zu einem Interesse an der Bildung allgemeingültiger Prinzipien, für die Einzelphänomene nur als Illustrationen stehen; siehe Punkt B.3.2.1.2)
- Realisationsdenken (Durchdenken von Problemen in vorgestellten alltagsnahen Realisierungen des Prozeßverlaufs; siehe Punkt B.3.2.1.1)

Da diese Vorverständniselemente sich gut bewährten und sie zudem einen größeren Phänomenvorrat besaßen, wurde das Postulat eines spezifischen Interesses an Reibungsphänomenen als Teil des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik aufgegeben.

*

Präkonzept der Kopplung von Trägheits- und Reibungsphänomenen

Das zweite Beispiel betrifft ein Präkonzept, nach dem Schüler Trägheits- und Reibungsphänomene miteinander verkoppeln oder vermischen. Auf den Punkt gebracht, lautet eine wichtige Erscheinungsform: "schwerelos = trägheitslos".

Als generelles methodisches Prinzip galt, daß für die Diskussion eines Vorver-

ständniselements Daten aus möglichst vielfältigen Erhebungsverfahren heranzuziehen waren. Während im ersten Beispiel der Anstoß zur Formulierung der Vorverständnishypothese aus der unmittelbaren Beobachtung von Schülerverhalten erwuchs und die kritische Überprüfung anhand von Wortprotokollen, schriftlichen Tests und Kurzinterviews erfolgte, liegt diesmal ein umgekehrter Weg vor. Angeregt durch einen Hinweis bei Jung (1981a), der eine Tendenz von Schülern zur Integration von Haftreibungsphänomenen in das Trägheitskonzept betraf (siehe dazu Punkt C.1.12) wurden in den Test DAM der zweiten schriftlichen Befragung zwei Denkaufgaben zur Trägheit-Reibung-Kopplung aufgenommen (Aufgaben B3 und B6; siehe Punkt B.2.2.2). Die Ergebnisse zeigten, daß eine große Gruppe von Schülern meinte, bei starker Herabsetzung von Gleitreibungskräften durch Luftkissen-Anordnungen spiele die Masse eines Körpers für seine Beschleunigung praktisch keine Rolle mehr. Das führte zur Formulierung des Präkonzepts 6 (siehe Punkt B.3.3.2.5).

Da das entscheidende Kriterium für die Aufnahme eines Denkrahmens, Präkonzepts usw. in das thematische Vorverständnis der Beitrag zum Verständnis von Schülerverhalten in konkreten Unterrichtssituationen ist, wurde in Wortprotokollen nach Belegen für das Fungieren der Trägheit-Reibung-Kopplung gesucht. Es konnten Belege dafür aus unterschiedlichen Kursen gefunden werden. Das Präkonzept spielt u.a. in den Rekonstruktionen des Schülerverhaltens in Fallstudie 3 eine Rolle (siehe Punkt E.4). Neben Belegen für ein jeweiliges Präkonzept wurden auf den Karteikarten immer auch Gegenbeispiele vermerkt, im vorliegenden Fall Situationen, in denen Schüler in korrekter Weise zwischen der an die Masse gebundenen Trägheit eines Körper und Reibungskräften unterschieden, die dem Gewicht proportional sind. Dies erfolgte, um bei den Darstellungen der Vorverständniselemente Einblick in Abwägungsentscheidungen geben zu können und dem Eindruck der Eindimensionalität von Schülerverhalten vorzubeugen.

*

Wir haben an zwei Beispielen die Methodik der Konstruktion und Überprüfung von Vorverständniselementen beschrieben. Starre Regeln für die Auswertungsschritte gab es nicht, aber es kristallisierten sich im Verlaufe der empirischen Arbeiten einige methodische Prinzipien heraus:

- Alle spontanen Ideen für mögliche fungierende Vorverständniselemente wurden zunächst festgehalten, auch wenn viele davon später mangels ausreichender Belege wieder wegfielen.
- Zu den Vorverständnishypothesen wurden Belege und Gegenbelege gesammelt.

- Die Überprüfung postulierter Vorverständniselemente erfolgte an Daten aus mehreren verschiedenen Datenerhebungsverfahren.
- Alle Vorverständniselemente wurden auf unmittelbare Unterrichtsrelevanz überprüft. Unterrichtsprotokolle entschieden letztlich über die Aufnahme eines Elements in das thematische Vorverständnis.
- Besondere Beachtung fanden Stunden mit "unterrichtlichen Konfliktsituationen", die häufig auf Kommunikationsproblemen beruhten: gegenseitiges Nicht- bzw. Mißverstehen von Lehrer und Schülern, Unzufriedenheit mit dem Unterrichtsverlauf auf Seiten von Lehrer und/oder Schülern, Widerstand von Schülerseite gegen bestimmte Vermittlungsabsichten des Lehrers, Schwierigkeiten der Verarbeitung bestimmter Lehrangebote.
- Das Datenmaterial wurde in einem spiralartigen Verfahren mehrmals durchgesehen, wobei aufgrund des durch neue Hypothesen veränderten Vorverständnisses des Verfassers jeweils zusätzliche Beobachtungen gemacht wurden.

Beim Vergleich mit dem in Abbildung A8 skizzierten empirischen Forschungsprogramm betreffen unsere Ausführungen primär den linken, aufsteigenden Strang, d.h. die Konstruktion einzelner Elemente des thematischen Vorverständnisses. Im weiteren Verlauf der empirischen Arbeiten wurde auf der Basis der Gesamtstruktur das Schülerverhalten in komplexen Unterrichtssituationen rekonstruiert. Solche Fallstudien finden sich im Kapitel E der vorliegenden Arbeit.

B.3

Entwicklung und Diskussion

des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik

B.3.1

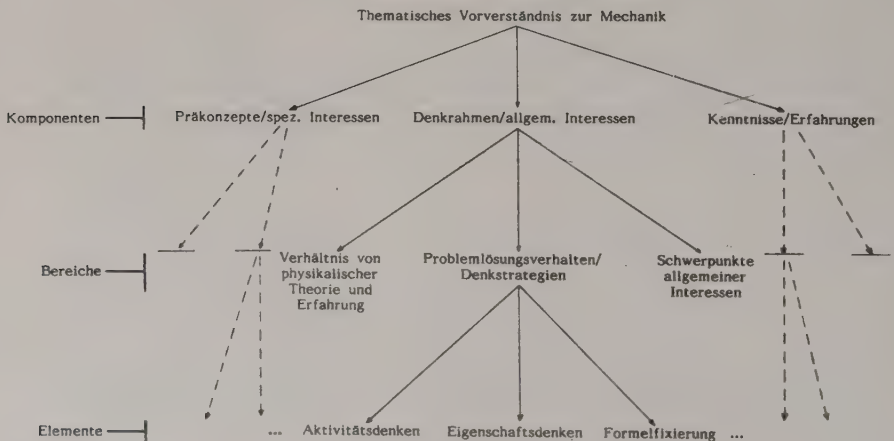
Einführung

Im vorliegenden Hauptteil des Kapitels B werden zentrale Elemente des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik in Thesenform formuliert, ihrem Gehalt und ihrer Bedeutung nach entwickelt und an Beispielen aus der empirischen Basis diskutiert. Wo dies zur Abrundung des Bildes notwendig erscheint, ist der Darstellung eine abschließende Zusammenfassung beigelegt. In die Diskussion einiger Vorverständniselemente sind längere, kommentierte Wortprotokollauszüge eingearbeitet. Wir sprechen dann von Fallstudien "erster Art". Sie dienen der Illustration einzelner Denkrahmen, Präkonzepte oder Interessen. In den ausführlicheren Fallstudien in Kapitel E (Fallstudien "zweiter Art") wird dagegen das Verhalten von Schülern in komplexen Unterrichtssituationen aus dem Zusammenspiel verschiedener Vorverständniselemente rekonstruiert.

Entsprechend der in Kapitel A entwickelten Systematik ist die Darstellung der Vorverständniselemente nach Komponenten gegliedert:

- Denkrahmen und allgemeine Interessen (Punkt B.3.2)
- Präkonzepte und spezifische Interessen (Punkt B.3.3)
- Kenntnisse und Erfahrungen (Punkt B.3.4)

Innerhalb der Komponenten werden die zugehörigen Vorverständniselemente nach Bereichen zusammengefaßt, so daß sich eine Darstellungshierarchie ergibt, die in der folgenden Graphik veranschaulicht ist.



Zur Darstellung des thematischen Vorverständnisses bedarf es einiger genereller Vorbemerkungen:

1. Zur Formulierung der Elemente

Aussagen wie "Schüler orientieren sich bei der Beobachtung, Beschreibung und Erklärung von Vorgängen an den vermeintlichen Verursachern" (Denkrahmen 6, siehe B.3.2.2.2) sind sprachliche Pauschalisierungen, die sich aber nur schwer umgehen lassen. Ausführlich müßte für den genannten Denkrahmen stehen: "Es gibt bei einer großen Gruppe von Schülern die charakteristische Disposition, sich bei der Beobachtung, ..." Das würde dem dispositionalen Charakter der Vorverständniselemente (vgl. Punkt A.3) besser gerecht werden, die Formulierungen jedoch sehr umständlich machen. Wir weisen daher in dieser Einführung allgemein darauf hin, daß die postulierten Elemente des thematischen Vorverständnisses

- a) nicht in allen individuellen Vorverständnissen fungieren.
- b) nicht in jeder Situation fungieren, auch wenn das Individuum über eine entsprechende Disposition verfügt, und
- c) in individuellen Vorverständnissen Elemente nebeneinander vorhanden sein können, die sich gegenseitig widersprechen.

2. Angaben über den Verbreitungsgrad

Angaben darüber, wie groß die Gruppe der Schüler ist, bei denen ein bestimmtes Präkonzept oder ein bestimmter Denkrahmen fungiert sind nur in groben Abschätzungen möglich. Zu einigen Elementen liegen aus schriftlichen Erhebungen Prozentzahlen vor. Aber auch hier ist Vorsicht geboten: Aufgrund seines dispositionalen Charakters kann sich ein Vorverständniselement in einer Situation (Testaufgabe) in beobachtbarem Verhalten manifestieren, während es in einer zweiten, ähnlichen Situation nicht zum Zuge kommt. Viele der von uns verwendeten Datenerhebungsverfahren geben den Schülern offene Antwortmöglichkeiten. Daraus, daß ein Schüler eine bestimmte Antwort nicht gibt, kann man in solchen Fällen nicht schließen, daß der Schüler gegenteiliger Meinung sei.

Die Aufnahme eines Elements in das thematische Vorverständnis wird nicht daran entschieden, ob seine Antreffhäufigkeit über einer festgelegten Grenze liegt, sondern daran, ob es sich bei der Interpretation von Unterrichtsprotokollen bewährt, ob es also beobachtetes Verhalten von Schüler plausibel erklären kann. Seine Kenntnis dient der Sensibilisierung der Unterrichtenden für das, was der Schüler mit seinen Aussagen tatsächlich meint und auf welche grundlegenden Strukturen sie zurückzuführen sind. Die aus Wortprotokollen und Befragungen entnommenen Beispiele haben exemplarischen Charakter. Allerdings wurde darauf

geachtet, daß keine "exotischen" Einzelfälle dargestellt sind. Da jeder Schüler seine Denkprozesse individuell vollzieht, würde die Kenntnis der globalen prozentualen Antreffhäufigkeit für das Verständnis des Einzelnen wenig beitragen. (Anders ist es, wenn man über grundlegende Veränderungen bei der Auswahl und Präsentationsform von Unterrichtsinhalten nachdenkt.)

3. Zur zeitlichen Entwicklung des Vorverständnisses

Eine Unterscheidung in ein thematisches Vorverständnis vor Beginn des Mechanikkurses in der Sekundarstufe II und eines nach dessen Abschluß haben wir nicht vorgenommen. Nach unseren Ergebnissen sind die individuellen Vorverständnisse sehr stabil gegenüber Veränderungen durch Unterricht (siehe z.B. Fallstudie 2, Punkt E.3). Das ist auch der Tenor anderer Untersuchungen in diesem Gebiet (siehe Punkt C.2.3). Unterricht führt eher dazu, daß neue Elemente gebildet und, zumindest als Kenntnisse, integriert werden, jedoch ohne daß die mitgebrachte Struktur dadurch wesentlich umgestaltet wird. Wir verweisen insbesondere auf den Kraftbegriff vor und nach der Einführung des Newtonschen Konzepts (siehe Punkt B.3.3.2.1). Um nähere Aufschlüsse über die zeitliche Entwicklung individueller Vorverständnisse zu gewinnen, muß man einzelne Schüler über lange Zeiträume intensiv beobachten. (B. Schenk hat ein entsprechendes Forschungsprogramm durchgeführt, auf das wir unter Punkt C.2.11 eingehen.) Uns liegen solche Daten nicht in genügender Dichte vor.

4. Zur Auswahl der dargestellten Vorverständniselemente

Bei den Kategorien "Denkrahmen" und "Präkonzepte" konzentrieren wir uns auf die Darstellung alternativer Rahmen und Konzeptualisierungen. Wir vermeiden den Terminus "Fehlkonzepte", weil die Elemente sich im Alltagsdiskurs bewähren. Natürlich machen physikalisch korrekte Präkonzepte ebenso wie physikalisch produktive Denkrahmen einen Teil der individuellen Vorverständnisse aus. Solche Elemente bedürfen jedoch keiner näheren Erläuterungen, weil sie dem Vorverständnis des Physikers oder Lehrers vertraut sind und daher leicht aufgenommen werden. Das Erkennen alternativer Konzeptualisierungen fällt schwerer. Die Kommunikation zwischen Lehrer und Schülern leidet oft darunter, daß der Lehrer nicht versteht, was die Schüler ausdrücken wollen und ungewohnte Aussagen schlicht als "falsch" abgetan werden. Impulse für Veränderungen von Vorverständnissen können aber nur dann gegeben werden, wenn man in der Lage ist, sich in die Gedankengänge des Schülers hineinzusetzen. Daher ist die Erläuterung alternativer Wahrnehmungs- und Fragehorizonte so wichtig.

5. Zum Inhaltsbereich

Inhaltlich bezieht sich das entwickelte thematische Vorverständnis auf die Newtonsche Mechanik. Der Begriff Energie spielt insoweit eine Rolle, wie Teile seines Gehalts in den Clusterbegriff 'Kraft' eingehen (allgemeine Wirkungsfähigkeit). Datenmaterial zu den physikalischen Begriffen Arbeit und Energie wurden jedoch nicht speziell erhoben. Präkonzepte über den Begriff Energie stellen ein eigenständiges Forschungsgebiet dar, das nicht "nebenbei" abgedeckt werden kann.

B.3.2 Vorverständniskomponente I: Denkraumen und allgemeine Interessen (D/AI)

B.3.2.1 Bereich I: Das Wesen physikalischer Erkenntnisgewinnung und das Verhältnis von physikalischer Theorie und Erfahrung

Fragen des Wesens physikalischer Erkenntnisgewinnung und des Verhältnisses von physikalischer Theorie und alltäglicher Erfahrung spielen in eine Reihe wichtiger allgemeiner Elemente des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik hinein. Wir untersuchen diesen wissenschaftstheoretischen Fragenkomplex ausführlich im Rahmen der Darstellung der historischen Genese der Mechanik am Übergang von der aristotelischen zur galileisch-newtonschen Physik (siehe Punkt D.3). In die Einführungen verschiedener Denkraumen und allgemeiner Interessen sind Kerneergebnisse der wissenschaftstheoretischen Analyse aufgenommen.

Ohne dem zu sehr vorgreifen zu wollen, machen wir in der allgemeinen Einleitung zu Bereich I einige Ausführungen zu Charakteristika naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung, die zum Verständnis des Gehalts und der Bedeutung der anschließend zu diskutierenden Vorverständniselemente beitragen. Für den Problemaufriß stützen wir uns auf drei Arbeiten von Künzli (1982), Redeker (1983) und Böhme (1981).

Unsere Ausgangsthese lautet:

Der Übergang vom lebensweltlichen zum physikalischen Denken vollzieht sich nicht einfach durch

- Verfeinerung der Beobachtung,
- Präzisierung des lebensweltlichen Begriffsinventars oder
- Systematisierung bereitstehender lebensweltlicher Erfahrung.

Er besteht vielmehr wesentlich

- in einem Wechsel der Intention des Denkens,
- im Mißtrauen der primären Erfahrung,
- im Aufbau eines neuen, eigenständigen Begriffssystems.

Künzli (1982) wendet sich der Frage zu, was denn die schulalltägliche Diskrepanzerfahrung von Lehrern und Schülern ausmache, d.h. die Erfahrung der Schwierigkeiten, sich über Physik zu verständigen. Als die beiden problemenerzeugenden Faktoren nennt Künzli erstens die "Allgemeinheit" und zweitens die "Sinnlichkeit". Die Idee des Anspruchs auf Allgemeingültigkeit hält Künzli für das Spezifische der wissenschaftlichen Erkenntnis, das sie von anderen Erkenntnissen unterscheidet. Daher sei jeder Unterricht der wissenschaftlichen Erkenntnis Herausarbeitung des Allgemeinen.

Wir wollen diesen Punkt an einem Auszug aus Carnots berühmter Arbeit "Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers" belegen. Carnot schreibt in der Einleitung, er beabsichtige, verschiedene Fragen zum, wie wir es heute nennen würden, Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen "einer eingehenden Betrachtung zu unterziehen" und fährt fort:

Das Phänomen der Erzeugung von Bewegung durch Wärme ist nicht unter einem hinlänglich allgemeinen Gesichtspunkt betrachtet worden. Man hat es nur an Maschinen untersucht, deren Wirkungsweise ihm nicht die ganze Entwicklung gestattet hat, deren es fähig ist. (...) Um das Prinzip der Erzeugung von Bewegung durch Wärme in seiner ganzen Allgemeinheit zu betrachten, muß man es sich unabhängig von jedem Mechanismus und jedem besonderen Agens vorstellen; man muß Überlegungen durchführen, welche ihre Anwendung nicht nur auf Dampfmaschinen haben, sondern auf jede denkbare Wärmemaschine, welches auch der angewandte Stoff sei und in welcher Art man auf ihn einwirkt.

(Carnot nach Samburski 1978, 505)

Carnot hat am Konstrukt des idealen, reversiblen Kreisprozesses allgemeine Prinzipien über das Maß der maximal gewinnbaren "bewegenden Kraft", ihrer Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz und ihrer Unabhängigkeit vom Agens entwickelt. Seine Arbeiten wirkten sich, im Gegensatz zu Fortschritten in der Produktionstechnik (z.B. im Kesselbau), nicht unmittelbar auf die Konstruktion und die Optimierung realer Dampfmaschinen aus (vgl. Pukies 1979a). Ihr Beitrag lag im grundsätzlichen Verständnis von Kreisprozessen. Die Kenntnis des theoretisch maximal erzielbaren Wirkungsgrades nützte dem Ingenieur und Maschinenbauer wenig. Die tatsächlich erzielbaren Wirkungsgrade lagen aus herstellungstechnischen Gründen ohnehin wesentlich niedriger.

Das Denken des allgemeinen Begriffs, des allgemeinen Falls, ist das zentrale Kennzeichen und gleichzeitig das zentrale Vermittlungsproblem wissenschaftlichen Denkens.

Der Schüler hat diese schwierige Konstruktion von Allgemeinheit zu leisten und dies immer wieder neu. (...) Jeder konkrete und praktische Fall in bestimmter Situation soll immer nur als Fall von etwas Allgemeinem verstanden werden. Und um dieses Allgemeine geht es, anders als in jeder realen Problemsituation.

(Künzli 1982, 7)

Der Schüler sei gefordert, seine alltägliche und lebenspraktische Intention und sein Verständnis von dem, was er als relevant ansehe, zu überschreiten. Der Wechsel der Intention bestehe darin, nicht mehr den konkreten Einzelfall lösen zu wollen, sondern den allumfassenden, den abstrakten allgemeinen Fall zu denken.

Die mit Schüler- und Alltagsvorstellungen bezeichneten Schwierigkeiten des Lernens von Wissenschaft (sind) genau dieser Wechsel der Intention und das wissenschaftskonstitutive Durchhalten des Wechsels.
(Künzli 1982, 19)

Wissenschaftliches und lebensweltliches Denken unterscheiden sich nicht an sich, d.h. im Prozeß ihres Vollzugs. Abstraktionen und Idealisierungen finden sich im Alltagsdenken ebenso wie in der Wissenschaft. (Wie wäre sonst z.B. zu entscheiden, ob ein bestimmter vorgefundener Gegenstand ein Sessel, Stuhl oder Hocker ist?) Nur besteht im Alltagsdenken kein explizites Bestreben zur Entwicklung und Überprüfung allgemeiner, abstrakter Begriffe und Prinzipien. Das implizit vorhandene Inventar mißt sich an seiner Bewährung bei der Einordnung, Beschreibung oder Erklärung konkret begegnender Fälle. Es werden keine hypothetischen, praktisch nicht realisierbaren Fälle geschaffen, um an ihnen die Allgemeinheit zu messen.

Mag der Anstoß für physikalische Reflexion von konkreten Problemen ausgehen (etwa vom verbreiteten Bau von Dampfmaschinen zur Zeit Carnots), so wird die Lösung des Problems bei der naturwissenschaftlichen Erkenntnis doch in einer davon abgehobenen Theoriesphäre gesucht. Dazu werden theoretische Kunstgebilde geschaffen (der ideale, reversible Kreisprozeß), die zunächst eine Entfernung von den realen Phänomenen mit sich bringen. Das Ausgangsproblem tritt in den Hintergrund oder gerät gar in Vergessenheit. Es dominiert die epistemische Intention der allgemeinen Erkenntnis. Erst nach einem oft langem Verbleiben in dieser Sphäre, werden Rücktransformationen auf konkrete Probleme möglich. Der Übergang in die theoretische Sphäre, in die Welt der idealen Gestalten, ist dem Alltagsdenken fremd. Hier werden Lösungen der auftretenden Probleme direkt am Objekt, am konkreten Fall gesucht. (Beim Dampfmaschinenbau brachte das schnellere Fortschritte als die Theorie der Kreisprozesse.) An den unterschiedlichen Intentionen und Problemlösungsstrategien können sich Lern- bzw. Vermittlungsschwierigkeiten entzünden.

Wenden wir uns dem zweiten problemenerzeugenden Faktor zu, der "Sinnlichkeit". Das Problem der Sinnlichkeit macht sich nach Künzli fest an der Diskrepanz zwischen natürlicher Ordnung und rationaler Ordnung. Die "natürliche Ordnung der Dinge" sei das Ergebnis unsystematischer und bedarfsgesteuerter Sammlung sinnlicher Erfahrungen. Die rationale Ordnung werde dagegen unter einem einheitlichen Konstruktionsprinzip gebildet. Ihr liege die vom Konstruktionsprinzip geleitete methodische Sammlung von Erfahrungen zugrunde. Um die Darstellung der rationalen Ordnung zu verstehen, sei es daher notwendig, das Konstruktionsprinzip zu kennen. Die alltägliche und sinnliche Erfahrung führe nicht notwendig

zur rationalen Ordnung, sondern in der Regel zu "falschen" Ergebnissen. Dies erfahre der Schüler dann auch im Physikunterricht.

Durch Erfahrung gewitzt, mißtraut (der Schüler) deshalb seinen alltäglichen Vorstellungen und verstummt mehr und mehr. (...) Das Mißtrauen in die primäre Erfahrung und die methodisch unkontrollierte sinnliche Wahrnehmung ist der primäre Schritt zur epistemischen Intention.
(Künzli 1982, 18)

Der Schüler erfährt im Physikunterricht die Welt gerade nicht so, wie sie sich dem unbewaffneten Auge der sinnlichen Erfahrung darstellt. Die Erkenntnis, daß die primäre Erfahrung im Hinblick auf physikalisches Denken oft nur auf falsche Fährten führt, ist eine der Nahtstellen des Übergangs vom lebensweltlichen zum wissenschaftlichen Denken. Künzli nennt als Beispiel Untersuchungen mit der bekannten "Kieler Wanne" (siehe Duit 1983). Die Vorhersage, ob eine Kugel über bestimmte Berghöhen hinüberrolle, setze als Konstruktionsprinzip den Energieerhaltungssatz voraus. Gleichzeitig sei von allen sinnlichen und konkreten Erfahrungen für die Problemlösung abzusehen, um allein die Höhe des Berges als bedeutsam anzusehen, nicht ob es sich um einen steilen oder flachen Anstieg handele.

Wir möchten hinzufügen, daß natürlich auch die Einbeziehung von Reibungseffekten bei der "Kieler Wanne" physikalisches Denken charakterisieren kann. Die einfache Vorhersage, die Kugel rolle nicht wieder auf ihre Ablaufhöhe zurück, befriedigt physikalisch jedoch nur unter bestimmten Bedingungen. Man bräuchte für sie weder über den Energieerhaltungssatz noch über den Energieerhaltungssatz (2. Hauptsatz) zu verfügen oder etwas über (Roll-) Reibungskräfte wissen. Die Vorhersage ließe sich aus der alltäglichen Erfahrung, z.B. beim Radfahren, unmittelbar ableiten. Die Aussage ist dann physikalisch "richtig", wenn sie auf einer Betrachtung des Phänomens unter allgemeinen Prinzipien beruht, wie sie z.B. durch den zweiten Hauptsatz gegeben sind. Der Umstand, daß Schüler dies in der Regel nicht tun, sondern aus intuitiven, auf unmittelbarer Erfahrung basierenden Überlegungen heraus argumentieren, ist letztlich die Begründung dafür, Vorhersagen des letztgenannten Typs als "falsch" zu bezeichnen und die Vorhersage, die Kugel erreiche wieder die gleiche Höhe, als "richtig". Letztere stimmt nämlich mit dem theoretischen Prinzip der Energieerhaltung überein und zeigt die Fähigkeit zu einer abstrakten Behandlung des Problems unter Absehen von der primären Erfahrung.

Künzlis Thematisierung der Allgemeinheit und Sinnlichkeit als problem erzeugende Faktoren erhellen die in der Eingangsthese genannten Schritte des Wechsels der Intention und des Mißtrauens in die primäre Erfahrung beim Übergang vom

lebensweltlichen zum physikalischen Denken. In ähnlichem Sinne argumentiert Redeker, der vehement den "Induktivismus der Didaktiker" kritisiert. Speziell greift er Wagenscheins These vom kontinuierlichen Weg des Schülers aus dem Alltag in die Physik an. Redeker legt u.a. an den Beispielen Trägheit, Geschwindigkeit, Farbe, Wärme dar, daß alltägliche und wissenschaftliche Denkweisen sich grundlegend unterscheiden.

Und so erweist sich nicht die sinnlich gegebene Wirklichkeit als der Erkenntnisgegenstand der neuzeitlichen Physik, sondern ein kausalgesetzlich gedachter Zusammenhang ideal-gesetzlicher Gestalten, der der sinnlich-empirischen Natur als ihre eigentliche Wirklichkeit unterstellt ist.

(Redeker 1983, 10)

Redeker nennt das den "mathematischen Entwurf der Natur". Dieser entwickle sich nicht stetig aus den Alltagserfahrungen. Physikalische Begriffe würden nicht durch fortgesetzte Aufnahme neuer Merkmale gebildet. Sie benötigten einen Gestaltwechsel, d.h. eine neue Sichtweise des lebensweltlich bereits Bekannten und Geklärten. Physikalische Begriffe seien aller Tatsächlichkeit, allen Feststellungen aus Erfahrungen vorangehend in ihrer Gültigkeit (vgl. Redeker 1978, 86). Es bestehe zudem keine natürliche Veranlassung, sich um physikalische Begriffe zu bemühen - sie seien für das Zurechtkommen in Umgangssituationen geradezu untauglich (vgl. Redeker 1978, 132).

Physiklernen erfordere vom Lernenden ein hohes Maß an Selbstentäußerung, die Bewußtseinsleistung der Idealisierung, das Außer-Geltung-Setzen der Ursprungseinstellung der Natur gegenüber:

Der Lernende muß das Wahrnehmbare als Bekundung des kausalgesetzlichen Zusammenhangs idealer Objekte neu "sehen" lernen, und zwar entgegen der Tatsache, daß dieser Zusammenhang in keiner Beobachtung direkt zugänglich ist.

(Redeker 1978, 332)

Auch bei Redeker findet man also die Elemente des Wechsels der Intention und des Mißtrauens in die primäre Erfahrung. Zu unserem dritten in der Eingangsthese genannten Punkt, den Unterschieden zwischen lebensweltlichen und naturwissenschaftlichen Begriffssystemen, führt Böhme (1981) eine Reihe interessanter Gesichtspunkte an.

Nach Böhme erfordert der Übergang vom Alltagswissen zum Wissenschaftswissen nicht einfach eine Präzisierung des vorwissenschaftlichen Wissens, sondern vielmehr eine umgreifende Reorganisation der Erfahrung. Die folgende Gegenüberstellung faßt die von Böhme herausgearbeiteten Unterschiede zusammen:

Erfahrung

lebensweltliche	wissenschaftliche
- Sinneserfahrung - Ganzheit des Phänomens ("schwüle Wärme") - unbestimmte Begriffe - objektgebundene Phänomene ("schwerer Hammer": Eigenschaft) - situationsgebunden, episodisch (Phänomene in bezug zum Menschen) - polarisiert ("warm" - "kalt")	- apparative, instrumentelle Erfahrung - Analyse des Phänomens in einzeln erfaßbare Variable (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, -druck, -strömung) - eindeutige Begriffe - trägerlose Phänomene ("Schwere": Wechselwirkung) - auch situationsgebunden, aber in dem Sinne: "Das Phänomen zeigt sich <u>in</u> einer Situation." - linearisiert ("mehr oder weniger warm")

Beim dritten Spiegelstrich werden Unterschiede zwischen lebensweltlichen und wissenschaftlichen Begriffen angesprochen. Die Bezeichnung lebensweltlicher Begriffe als "unbestimmt" oder "vage" kennzeichnet eine Betrachtungsweise von der Warte der Wissenschaft: Man greift einen lebensweltlichen Begriff heraus und mißt ihn an Kriterien wissenschaftlicher Begriffe. Man stellt z.B. fest, daß er in unterschiedlichen Zusammenhängen Verwendung findet, für die bei physikalischen Beschreibungen klare begriffliche Differenzierungen vorzunehmen wären. So ist der Alltagsbegriff 'Wärme' durch 'Temperatur', 'Wärmeenergie', 'Konvektion' oder 'Entropie' zu ersetzen, um eine wissenschaftliche Kommunikation sicherzustellen. Bei der Bewertung von 'Wärme' als "unbestimmt" bleibt jedoch außer acht, daß der Alltagsdiskurs nie über 'Wärme' an sich stattfindet. Es ist immer ein konkreter situativer Kontext gegeben, der die Verständigung gewährleistet.

Der Charakter der Unbestimmtheit kommt in (die lebensweltliche) Erfahrung erst durch die Isolierung gegen die lebensweltlichen Zusammenhänge hinein. Das Residuum dieser Isolierung, die "reine Qualität", ist deshalb unbestimmt, weil sie lebensweltlich in verschiedenen Situationen vorkommt.
(Böhme 1981, 94)

Das Wort "Wärme" in den beiden Aussagen "Das ist vielleicht eine Wärme heute" oder "Durch das Fenster strömt viel Wärme heraus" vermittelt dem Kommunikationspartner unterschiedliche Botschaften. Der ersten Aussage ist zu entnehmen, daß hohe Temperaturen herrschen, eventuell verbunden mit hoher Luftfeuchtigkeit. Im zweiten Fall geht es um Strömung erwärmter Luft (Konvektion). Alltagsbegriffe sind also keineswegs unbestimmt und vage. "Vage" wird der Begriff

erst dann, wenn man ihn der Gebrauchskontexte beraubt, die konstitutiv zu ihm gehören.

Die "Indexikalität" der vorwissenschaftlichen Begriffe ist eine Präzision (im Kontext) und Vagheit (in der Vermittlung von verschiedenen Kontexten). Der erste Schritt der Verwissenschaftlichung schneidet die Kontexte ab und läßt zunächst nur ihre Unbestimmtheit zurück. Die Wissenschaft muß dann erst systematisch ihre eigene Präzisierung erzeugen. (Böhme 1981, 90)

Wir bezeichnen die Begriffe 'Kraft', 'Wärme', 'Strom', wie sie von Schülern im Physikunterricht häufig im physikalischen Sinne "falsch" verwendet werden, als Clusterbegriffe. In ihnen spiegelt sich ein typisches Merkmal lebensweltlicher Begriffe wieder: Vagheit in der allgemeinen Bedeutung und Präzision im Verwendungskontext. Die Präzision liegt in der Sicherstellung von gegenseitiger Verständigung in der direkten Kommunikation.

Man darf bei der Darstellung der Unterschiede zwischen lebensweltlichen und wissenschaftlichen Begriffen nicht vergessen, daß die Termini 'Kraft' und 'Strom(stärke)' ihre exakte, kontextfreie Bedeutung erst nach Abschluß der jeweiligen physikalischen Theorien errungen haben. In der Phase der Theorieentwicklung war, wie wir unter Punkt D.4 am Beispiel des Kraftbegriffs aufzeigen, die Bedeutung keineswegs so eindeutig, wie sie uns heute erscheint. Allerdings bestand ein Bestreben, die Begriffe einer eindeutigen Klärung zuzuführen, bzw. die entsprechenden Theorien "abzuschließen". Ein solches Bestreben, das sich aus der epistemischen Intention der Wissenschaften ergibt, fehlt in der Lebenswelt und ist hier auch nicht notwendig.

Beenden wir die Einführung in den Bereich I "Wesen physikalischer Erkenntnisgewinnung und Verhältnis von physikalischer Theorie und Erfahrung" mit einer Gegenüberstellung der herausgearbeiteten Merkmale:

Lebenswelt	Wissenschaft
<u>Intention:</u> Lösung konkreter Probleme in konkreten Situationen	<u>Intention:</u> Bildung übergreifender, umfassender Beschreibungsmuster; das Einzelphänomen ist nur <u>ein Fall</u> von einem allgemeinen Prinzip/Gesetz
<u>Erfahrung:</u> ganzheitlich, objekt- und situationsgebunden, sinnlich	<u>Erfahrung:</u> zergliedernd, apparativ; orientiert an theoretischen Entwürfen der Natur; Mißtrauen in primäre Erf.
<u>Begriffe:</u> vage in allgemeiner Bedeutung, scharf durch Bedeutungsausprägung in der Kommunikationssituation	<u>Begriffe:</u> umfassend allgemeingültig, scharf durch eindeutige Definition, kontextfrei diskutierbar

Es folgt nun die Darstellung der Denkraumen und allgemeinen Interessen von Schülern, die sich in das Themenfeld einfügen. Die Vorverständniselemente beleuchten den Bereich des Wesens physikalischer Erkenntnisgewinnung und des Verhältnisses von Theorie und Erfahrung unter verschiedenen Schwerpunktsetzungen. Es bleibt jedoch ein zusammenhängender Bereich. Daher lassen sich gewisse Überschneidungen bei den Formulierungen der Vorverständniselemente, bei ihrer Diskussion und bei der Zuordnung von Belegen nicht vermeiden.

B.3.2.1.1

Denkrahmen 1: Realisationsdenken

D1: Schüler durchdenken Probleme, die als Gedankenexperimente konstruiert sind, oder solche, für deren Bearbeitung bestimmte Abstraktionen vorausgesetzt sind, in vorgestellten alltagsnahen Realisierungen des Prozeßverlaufs.

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Probleme, die als Gedankenexperimente angelegt sind, bzw. solche, in die dem Gehalt nach bestimmte Abstraktionen eingearbeitet sind, werden von Schülern häufig unter folgender Fragestellung durchdacht: "Wie würde der Vorgang/das Experiment verlaufen, wenn man ihn/es tatsächlich durchführen würde?"

Diese Art der Herangehensweise kann dazu führen, daß Randbedingungen in das Problem einbezogen werden, die in der Aufgabenformulierung nicht auftauchen, an die bei der Konstruktion des Problems nicht gedacht worden war oder die sogar ausdrücklich in der Aufgabenstellung als zu vernachlässigen gekennzeichnet sind. Die Disposition zum Realisationsdenken kann sich weiterhin in bewußt geäußertem oder unterschwellig fungierendem Widerstand gegen idealisierte Phänomenbetrachtungen ausdrücken. Schüler sträuben sich dann gegen Annahmen, die im Widerspruch zu Realitätserfahrungen stehen.

In der Mechanik sind vor allem dissipative Reibungseffekte von Abstraktionen betroffen. Viele Aufgaben setzen die Vernachlässigung von Luft-, Roll- oder Gleitwiderständen voraus. Die Feststellung, daß Schüler von sich aus diese Effekte wieder einbringen, ist nicht als Kritik an einer "unphysikalischen" Vorgehensweise zu werten. (Man könnte eher kritisieren, daß in der Schule teilweise der Eindruck erweckt wird, als sei der Gegenstandsbereich der Mechanik eine reibungsfreie Vakuum-Welt.) Der physikalische Zugriff auf Wirklichkeit ist jedoch seit den Zeiten Galileis gekennzeichnet durch die gedankliche Zerlegung der meist komplexen "Anfaß- und Vorzeigerealität" in ihr unterstellte ideal-geometrische Gestalten. Wir verwenden den Terminus "Anfaß- und Vorzeigerealität" (AVR) als Gegensatz zu "ideale Gestalt" zur Bezeichnung all dessen, was unserer Erfahrung zugänglich ist, bzw. durch entsprechende Präparation zugänglich gemacht werden kann. Der Zweck der Ausgrenzung bestimmter, in der AVR auftretender Einflußgrößen, wie etwa des Luftwiderstands, liegt in der Schaffung "reiner Phänomene", an denen sich einfache Begriffe, Prinzipien und Gesetze entwickeln lassen. Die Idee, daß es solche Phänomene gibt, ist wiederum Ausdruck des konstruktiv-spekulativen Charakters physikalischer Naturbetrachtung. Reine Phänomene lassen sich, weil es sich um gedankliche Schöpfungen handelt, nie in Vollkommenheit verwirklichen. In der Theoriebildungsphase werden gleich-

wohl große Anstrengungen unternommen, sie in möglichst guter Näherung im Experiment herauszupräparieren. Galilei bemühte sich intensiv um den Nachweis des Gesetzes, bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung verhielten sich die in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege wie die ungeraden Zahlen, anhand seiner berühmten Fallrinnenexperimente (siehe Punkt D.3.4). Luftkissenfahrbahnen und Vakuumröhren sind moderne materielle Resultate von "Realisationshandlungen" (Holzkamp 1968), die nicht mit Denkraumen 1 verwechselt werden dürfen.

Paradigmatische Phänomene und damit verknüpfte Begriffe dienen in der Phase der Theorieanwendung als Analyseinstrumente. Sie werden in vorfindliche Prozesse hineinprojiziert und verwandeln Neues in stückweise Bekanntes. Ohne diese Naturentwürfe wäre eine nach allgemeingültigen Prinzipien geordnete Verarbeitung der vielfältigen Erfahrungen und Meßdaten nicht möglich. Ein Physiker ist in der Lage, die Bewegung eines Tennisballs quantitativ zu beschreiben, weil er sie nach idealen Gestalten zerlegen kann (Bewegung mit geschwindigkeitsproportionaler Reibungskraft, gleichförmig beschleunigte Bewegung, Prinzip der ungestörten Überlagerung), die jeweils einzeln an viel einfacheren Beispielen, oft auch an Gedankenexperimenten, entwickelt und eingeübt wurden.

Die Einführung zu Denkraumen D1 diene zur Klärung des Zwecks "realitätsferner" Annahmen bei der Vermittlung physikalischer Erkenntnisse und ihrer Einarbeitung in Aufgaben von Verständnistests. Wir reagieren damit auf eine Kritik von Schäfer (1984) an einer "Verzerrung der Natur" durch solche Items. Gleichzeitig wird klar, warum die Disposition zum Realisationsdenken ein Problem bei Vermittlung/Erwerb physikalischer Kompetenz sein kann. Sie steht einem wesentlichen methodischen Element bei der Theoriebildung entgegen. Im Unterricht kann es zu Kommunikationskonflikten kommen, wenn den Schülern die Funktion und der Sinn von Abstraktionen nicht genügend erläutert wird.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Folgen bei der Interpretation von Aufgabenstellungen

Wir beginnen mit einem Beispiel aus einer Nebenerhebung mit Physik-Erstseminestern. Im Themenbereich "Harmonische Schwingungen" wurde folgende Übungsaufgabe gestellt:

"Eine Kugel rollt eine schiefe Ebene hinunter und unmittelbar anschließend eine gleichartige schiefe Ebene wieder hinauf usw. (keine Energieverlust). Ist die periodische Bewegung eine harmonische Schwingung? Man stelle Elongation, Geschwindigkeit und Beschleunigung als Funktionen der Zeit graphisch dar!"

Bei insgesamt 11 Studenten sahen 3 von einer Bearbeitung der Aufgabe ab, weil sie meinten, die Aufgabe nicht verstanden zu haben. Sie stellten sich die schiefen Ebenen in Übereinstimmung mit der Aufgabenformulierung so wie in der untenstehenden Abbildung vor. Der Ansatz wurde jedoch wieder verworfen.



Die Aufgabe könne so nicht gemeint sein, da durch den Knick am Übergang der beiden Ebenen die Kugel springen würde, was unweigerlich einen Energieverlust zur Folge habe, der wiederum im Text ausgeschlossen sei.

Zwei Studenten formulierten das Problem um. Sie gingen davon aus, daß es sich um eine kreisförmige Bahn handeln müsse. Einer schrieb: "Da kein 'Energieverlust' vorliegen soll, nehme ich an, daß die Ebene wie folgt aussieht: (vgl. Abbildung)." Sechs Studenten bearbeiteten das Problem so wie es gemeint war. Zwei davon erst nach Rückfrage beim Verfasser zum "Knick".



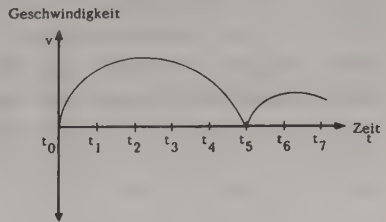
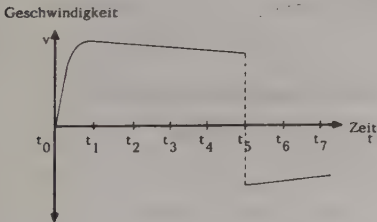
Der Einwand, an der Berührungsstelle komme die Kugel ins Springen, ist natürlich berechtigt. Bei der Aufgabenkonstruktion war davon ausgegangen worden, daß die Studenten von sich aus diesen Punkt als zu vernachlässigen einschätzen würden. Die Aufgabe war als einfaches Beispiel zum Durchdenken des Prinzips der harmonischen Schwingung entwickelt worden. Es wäre aus der Sicht des Aufgabenkonstruktors eine unbedeutende Veränderung gewesen, den Übergang etwas abzurunden. Im Denkraum des Realisationsdenkens lag hier für 7 von 11 Studenten der entscheidende Knackpunkt. Drei Studenten wurden dadurch davon abgehalten, sich überhaupt an diesem Beispiel mit dem Begriff der harmonischen Schwingung auseinanderzusetzen. Bei der realen Durchführung eines entsprechenden Experiments wäre der Übergang tatsächlich von großer Bedeutung. Für die Begriffsbildung ist er es nicht. Im Gegenteil: Die Aufgabe würde durch einen größeren Abrundungsbogen stark verkompliziert. Die Studenten, die einen Kreisbogenabschnitt als Bahn annahmen, scheiterten an den Funktionen $x(t)$, $v(t)$, $a(t)$.

Die Vorstellung einer verschwindend geringen Rollreibung bereitete offenbar weniger Probleme. Selbst unter der Überlegung, daß vielleicht einige Studenten

nicht bis zu diesem Aspekt vorgedrungen sind, liegt hier, ebenso wie bei den 4 Studenten, die die Aufgabe ohne Nachfragen richtig bearbeiteten, ein Gegenbeispiel zum Realisationsdenken vor.

*

Der zweite Beleg bezieht sich auf Aufgabe B2 des Tests DAM. 21% der Schüler zeichnen bei der Kurve für die Geschwindigkeit der Elfenbeinkugel einen deutlich erkennbaren Abfall nach Erreichen eines anfänglichen Maximalwertes ein. Gezählt sind hierbei nur die Schüler, die die Aufgabenstellung im Grundsatz verstanden haben, bei denen insbesondere eine Verwechslung mit einem s-t-Diagramm ausgeschlossen werden kann ($N = 226$). Einige Schüler bearbeiteten die Aufgabe doppelt, einmal "mit Reibung", einmal "ohne Reibung". Die Einbeziehung von Reibungseffekten wurde damit von einem Fünftel der Schüler vorgenommen, obwohl die Aufgabe in Richtung auf Reibungsvernachlässigung formuliert war (Elfenbeinkugel auf Billardtisch) und obwohl aus der beigelegten Skizze gerade nicht auf einen Rückgang des Betrags der Geschwindigkeit geschlossen werden konnte (ab t_1 gleiche Wege in gleichen Zeiten). Wir führen das auf ein Fungieren von Realisationsdenken zurück. Zwei Beispiele für v-t-Diagramme:



*

Beleg Nummer 3 stützt sich auf ein Teilergebnis zu Item B4 der Erhebung DAM. Die Bewegung des Gleiters auf der Luftkissenfahrbahn sollte unter Ausschluß der Reibung analysiert werden. In den selbstformulierten Antworten schrieben 20% der Schüler ($N = 254$), der Schlitten gleite nach dem Ausgleich der Gewichtsstücke langsam aus. Ein Großteil dieser Antworten kann darauf zurückgeführt werden, daß der direkte Hinweis auf Reibungsfreiheit, der zusätzlich zur bereits auf Reibungsvernachlässigung verweisenden Luftkissenbahn-Anordnung im Aufgabentext enthalten ist, nicht aufgenommen wurde. Die Schüler stellten sich das Problem in einer praktischen Realisierung vor und kamen zu

dem dann korrekten Schluß, daß sich die Geschwindigkeit verringert. Ein Zitat:

"Durch die Trägheit der Masse wird der Wagen noch einen Moment lang weiterfahren, jedoch vermindert sich seine Geschwindigkeit, da kein Antrieb mehr vorhanden ist und die Bewegung des Wagens durch Reibung beeinflußt wird."

Der Gewichtsüberschuß auf der linken Seite in der ersten Phase der Bewegung wird bei dieser Aussage nicht in einen Zusammenhang mit Beschleunigung gebracht, sondern als "Antrieb" eingeordnet, der die Reibungswiderstände ausgleicht. Es ist, wie oft bei ähnlich gelagerten Aufgaben, nicht durchgängig zu entscheiden, ob der Antworttyp "Schlitten kommt zur Ruhe" auf einem verkürzenden Präkonzept 'Kein Antrieb - keine Bewegung' beruht oder auf einer newtonsch korrekten Überlegung, daß bei Wirken einer Reibungskraft, als verbleibende angreifende Kraft nach Wegfall der Antriebskraft, der Körper verlangsam wird. Festzuhalten bleibt, daß ein beachtlicher Teil der Schüler das Item B4 - im Gegensatz zu dessen Intention und entgegen den deutlichen Hinweisen im Aufgabentext - unter Einschluß von Reibungseffekten durchdacht hat, was die Disposition zum Realisationsdenken zum Ausdruck bringt. Dazu ein abschließendes Zitat aus einer Nachbesprechung der Aufgabe:

Lehrer (trägt Lösung der Aufgabe vor)

Daniel So ein Scheiß, bei mir hält das Ding an.

Lehrer Bei fast allen hält das an.

Daniel Ich probier das gleich mal aus.

Lehrer Wenn keine Reibung wirkt, dann - (wird von Kurt unterbrochen)

Kurt Das versteh ich nicht. Es gibt doch immer eine Reibung.

*

Widerstand gegen Abstraktionen

Ein letztes Beispiel aus der Befragung DAM kann als subtiler Ausdruck von Widerstand gegen Abstraktionen gewertet werden. Bei der Beantwortung von Aufgabe B6 gingen mehrere Schüler auf den Einfluß der unterschiedlich großen Frontflächen der beiden Holzklötze ein. Die Aussagen lauteten sinngemäß: "Der große Klotz wird geringer beschleunigt, weil durch seine größere Stirnfläche sein Luftwiderstand größer ist." Hier wird akzeptiert, daß durch den Luftkissentisch die Reibung zwischen Klötzen und Unterlage aufgehoben ist. Dafür wird der Effekt der unterschiedlichen Abmaße der Stirnflächen als neue Randbedingungen ins Spiel gebracht - ein Parameter, an den bei der Konstruktion der Aufgabe niemand gedacht hatte. Man kann eine Aufgabenstellung praktisch nie vollkommen wasserdicht gegen die Einbringung von "Dreckeffekten" machen

(zum gleichen Ergebnis kommt Whitaker 1983, 355). Der Luftwiderstand des Gleiters in Aufgabe B4 kann eine Ursache der oben besprochenen Antworten sein, daß das Fahrzeug nach Ausgleich der Gewichte an Geschwindigkeit verliere (im Text wird nur auf die Vernachlässigung des Gleitwiderstands hingewiesen).

*

Erschwerung von Phänomenbetrachtungen durch vorzunehmende Abstraktionen

Es gibt eine Gruppe von Schülern, für die eine Phänomenbetrachtung durch vorzunehmende Abstraktionen erschwert wird. Die Erschwerung liegt darin, daß sie von Realitätserfahrungen nicht absehen können oder daß sie den Sinn idealisierter Phänomenbetrachtungen nicht erkennen und sich dann mit den gestellten Problemen nicht auseinandersetzen. In den folgenden Ausschnitten aus einem Gruppeninterview über den Sinn der physikalischen Methode, Phänomene unter z.T. weitgehenden Abstraktionen zu betrachten, kommt das bei Oswald, der sich als erster zu Wort meldete, zum Ausdruck. Oswald hatte sich auch im Unterricht verschiedentlich gegen bestimmte Abstraktionen gewandt.

Oswald Die Physik geht immer von Idealvorstellungen aus. Ich habe mich schon immer darüber geärgert: Da spricht man vom luftleeren Raum - kann ich mir gar nichts unter vorstellen. Sowas kann man nie realisieren. Luftreibung ausgeschlossen - das kann man sich immer sehr schwer vorstellen. Man darf es einfach nicht ausschließen in der Natur. In der Natur darf man nicht behaupten, daß ein Auto immer gleich schnell fährt, wenn man das Gas wegnimmt. Normalerweise müßte es ja immer so sein ... (akustisch nicht zu verstehen). Aber es kommen ja noch so viele andere Sachen da immer noch zu. Aber irgendwie kann man das schwer übertragen, weil eben die ganzen Formeln, die wir lernen, immer auf Idealvorstellungen beruhen - irgendwie auf luftleerem Raum. Da ist keine Reibung, keine weiteren störenden Einflüsse. Kann man also schlecht übertragen.

Oswald drückt seinen Standpunkt sehr einsichtig aus. Bezeichnend ist der von ihm gewonnene Eindruck, das erste Newtonsche Axiom behaupte, ein Auto behalte seine Geschwindigkeit bei, wenn man das Gas wegnimmt. Dem Physikunterricht ist es nicht gelungen, Oswald die Funktion von Idealisierungen bei der physikalischen Begriffs- und Theoriebildung zu vermitteln. Eine Schwierigkeit hierbei liegt darin, daß die Disposition zum Realisationsdenken Schüler dazu verleitet, Beispiele, die zur Illustration eines theoretischen Prinzips (z.B. des Trägheitssatzes) gedacht sind, in an sich bedeutsame und im einzelnen zu betrachtende Fälle umzudeuten, bei denen die zur Herausarbeitung des Prinzips vorgenommenen Abstraktionen dann mit Recht unsinnig erscheinen (vgl. das Eingangsbeispiel aus dem Bereich der harmonischen Schwingungen). Die Kritik von Oswald und Rainer (s.u.), daß auf die Umsetzung der an reinen Phänomenen

entwickelten Prinzipien und Gesetze auf tatsächliche Verhältnisse zu wenig eingegangen werde, sollte aufhören lassen.

- Rainer Vor allen Dingen weiß man dann eben schlecht, wo man es einsetzen soll - also auf die wirklichen Verhältnisse. Man weiß zwar, wenn jetzt ein luftleerer Raum da wäre, daß das dann so oder so passieren würde, aber man kann das ja hier nicht umsetzen.
- Falk Ich finde, zum einfachen Verständnis wäre es besser, wenn man störende Faktoren erst einmal ausschließt, und daß man dann nachher drangeht - wie die Raumfahrtingenieure meinetwegen, wenn die berechnen, wie eine Rakete abgeschossen wird - daß man dann schon aufgrund der Erfahrung, die man mit dem luftleeren Raum gemacht hat, daß man dann die Luft einbezieht, daß man dann also auf das bauen kann, was man sich erarbeitet hat und dann noch die anderen Faktoren hinzunimmt.
- Kai Ich meine, es wäre schlecht möglich, ohne irgendwelche Vereinfachungen Physik zu betreiben, zumal Schulphysik zu betreiben, wenn man immer an das Objekt herangehen würde. Ja, das wäre dann alles viel komplizierter. Es ist dann besser - wenn man so ein Modell hat, kann man das vielleicht auch besser erklären und vereinfachen.
- Oswald Ja, dann heißt es auf einmal "Stellt euch vor, wir hätten keine Reibung" und auf einmal saust das Auto ab. Ich finde, das kann man sich gar nicht so gut vorstellen, und dann wird es auch schwieriger, solche Aufgaben zu berechnen.

Realisationsdenken kann auch als Ausdruck der berechtigten und erhaltenswerten Hoffnung und der Forderung aufgefaßt werden, daß die Physik zum Verständnis der umgebenden Erfahrungswelt, die ja gerade nicht reibungsfrei ist, beiträgt. Schüler, die wie Oswald Zweifel an der Berechtigung bestimmter Abstraktionen äußern, nehmen die Physik vielleicht ernster als solche Schüler, die sich wegen der Vereinfachung von Experimenten und Aufgaben, die mit idealisierenden Annahmen verbunden ist, mit beliebigen Abstraktionen abfinden, ohne über ihren Sinn nachzudenken. Echte Lernschwierigkeiten, also nicht allein Uminterpretationen von gestellten Aufgaben oder Kommunikationskonflikte, resultieren aus der Disposition zum Realisationsdenken jedoch dann, wenn damit eine generelle Schwierigkeit einhergeht, sich von der Dominanz sinnlicher Anschauungen zu befreien. Den Schülern ist dann der Zugang zu derjenigen Zugriffsweise auf die Anfaß- und Vorzeigerealität behindert, mit der die Physik die oben angeführte Forderung, bzw. die Hoffnung auf Realitätsbezug einzulösen versucht. Die Physik leitet ihre Prinzipien und Gesetze nicht unmittelbar aus der Erfahrung ab. Der Zugang zum Vorfindlichen erfolgt auf der Grundlage theoretischer Entwürfe und gedanklich konstruierter "reiner" Phänomene. Wir entwickeln dieses zentrale Charakteristikum physikalischer Erkenntnisgewinnung unter Bezug auf historische Entwicklungslinien im Kapitel D. Dort werden weitere relevante Ergebnisse aus den Erhebungen DAM (Denkaufgaben zur Mechanik) und MdP (Methodik der Physik) eingebracht.

Fähigkeit zur Unterscheidung zwischen konkret-realisationsbezogenen und abstrakt-spekulativen Zugriffen auf Phänomene - Eine Fallstudie

Man findet in den Unterrichtsprotokollen zahlreiche Beispiele, in denen das Realisationsdenken nicht fungiert. Die Elemente des thematischen Vorverständnisses beschreiben Dispositionen, d.h. potentiell verhaltensbestimmende Strukturen. Daher ist es zwar ein Gegenbeispiel aber kein Widerspruch, wenn wir im folgenden Situationen darstellen, in denen Schüler Fallunterscheidungen zwischen der Betrachtung eines Phänomens unter real antreffbaren und unter nur gedanklich konstruierbaren Randbedingungen vornehmen. Gleichzeitig soll demonstriert werden, daß sich Kommunikationsschwierigkeiten zwischen Lehrer und Schülern, die sich zu unterrichtlichen Konflikten (Lernblockaden, Unzufriedenheit über Unterrichtsverläufe) steigern können, abbauen lassen, wenn die unterschiedlichen Betrachtungsweisen explizit herausgearbeitet werden.

Die Protokollauszüge stammen aus der Anfangsphase eines Leistungskurses Mechanik. Vorausgegangen waren Experimente zur Fallbewegung verschiedener Körper im Treppenhaus der Schule (Seidenpapierkugel, Papierhütchen, Stahlkugel, Holzkugel, Staniolpapierkugel. Zu den aufgenommenen Weg-Zeit-Wertepaaren wurden Diagramme angefertigt. Anhand der Diagramme sollen nun Bewegungsformen klassifiziert und kinematische Begriffe entwickelt werden.

- Falk Graph 1 und 8, das sind etwa Parabeln. Die anderen sind mehr oder weniger Geraden. Die Körper zu Graph 1 und 8 sind Kugeln. Bei den anderen Graphen sind es leichte Teile, die von der Luft abgebremst werden. Diese leichten Teile haben dann immer die gleiche Geschwindigkeit. Im Gegensatz dazu die Kugeln - sie werden immer weiter beschleunigt, die Geschwindigkeit erhöht sich.
- Frank Falk hat gesagt, daß die leichten Teile immer die gleiche Geschwindigkeit haben, aber am Anfang des Graphen sieht man hier auch einen leichten Knick. Deshalb ist die Zeit, in der der leichte Körper eine konstante Geschwindigkeit erreicht - die ist eben kürzer, so daß nach einer kürzeren Zeit eine maximale Geschwindigkeit erreicht ist. Aber am Anfang stellt der Graph auch eine Parabel dar.
- Lehrer Du meinst das Seidenpapierstück?
- Falk Ja, das untere Stück vom Graphen ist nicht gerade, sondern leicht gekrümmt.
- Schüler Die Beschleunigung geht praktisch gegen Null bis zur Maximalgeschwindigkeit des Körpers.
- Tom Ich muß Frank auch zustimmen. Da ist z.B. der Graph 1, bei dem das Silberpapier eine Beschleunigung mit viel kürzerer Zeit erfährt. Der Papierhut hat seine maximale Geschwindigkeit auch viel schneller erreicht, das erkennt man an dem ziemlich geraden Graphen.

Lehrer Das liegt jetzt hier die ganze Zeit im Raum. Was verbinden wir mit einem geraden Graphen?

Frank Wir verbinden damit die gleichförmige Bewegung. D.h. also, daß der Körper, während er fällt, nicht schneller wird oder langsamer, sondern immer die gleiche Geschwindigkeit beibehält.

Die qualitative Beschreibung der Bewegungen auf der Grundlage der Weg-Zeit-Diagramme gelingt den Schülern, ohne daß vorher kinematische Begriffe definiert worden wären. Ein Thema, das sich durch die gesamte Diskussion ziehen wird, deutet sich bereits an: Erreicht jeder Körper, also auch die Stahlkugel, nach genügend langer Fallstrecke eine endliche Maximalgeschwindigkeit?

Tom Ich möchte noch etwas allgemeines sagen, und zwar zu dem Graphen mit der Stahlkugel. Die Krümmung bei diesem Graphen läßt sich darauf zurückführen, daß der Körper noch nicht seine maximale Geschwindigkeit erreicht hat oder die Meßgenauigkeit zu groß ist. Das beste Beispiel für das Ansteigen der Geschwindigkeit wird Graph 1 sein. Der Graph wird erst ungefähr bei 10m gerade - zumindest ist die Krümmung dann nicht mehr so eindeutig abzulesen.

Tom setzt voraus, daß jeder Körper eine maximale Endgeschwindigkeit erreicht. Durch Experimente oder unmittelbare Anschauung ist diese Aussage nicht zu belegen. Die Überlegung beruht auf einer spekulativen Extrapolation der Ergebnisse zum Fall von Seidenpapierkugeln und Papierhütchen. Unausgesprochen vorausgesetzt ist dabei, wie wir später sehen werden, daß der Fall unter natürlichen Bedingungen, d.h. in Luft stattfindet.

Eine kurze Randbemerkung: Galilei hat in den 'Discorsi' sehr ähnliche Gedanken geäußert:

Eine Kugel (kann) nie zu gross, noch zu schwer gedacht werden, als dass der Widerstand des Mediums, wenn letzteres auch noch so dünn ist, nicht die Beschleunigung vermindere, und bei fortgesetzter Bewegung dieselbe zuletzt gleichförmig werden lasse.
(Galilei 1637, 81)

Wir überspringen eine Passage im Protokoll, in der über die Bedeutung der Krümmung der Graphen gesprochen wird. Die Schüler bringen dabei den Gesichtspunkt ein, es müsse an einer bestimmten Stelle des Graphen einen mehr oder weniger scharfen "Knick" beim Übergang von einer gekrümmten Kurve zu einer Geraden geben. Der "Knick" liege dort, wo der Körper seine Maximalgeschwindigkeit erreicht habe. Der Lehrer versucht die Frage der Existenz einer Maximalgeschwindigkeit aus der Diskussion herauszuhalten. Er möchte erst einmal eine gleichförmige und eine beschleunigte Bewegung in Reinform geklärt sehen. Die Schüler aber widmen dem Aspekt der Maximalgeschwindigkeit ihr besonderes Augenmerk.

Berthold Ein Körper hat seine Höchstgeschwindigkeit in einer bestimmten Zeit erreicht. Von da ab legt er in einer bestimmten Zeit immer die gleiche Strecke zurück.

Lehrer Das Problem haben wir doch schon erledigt.

Berthold Ab da muß es eine gerade Linie sein und darf keine Krümmung mehr haben.

Lehrer Dieses Postulat möchte ich gerne mal erklärt haben.

Berthold Ja, weil der Graph gleichmäßig ansteigt, in der gleichen Zeit die gleiche Strecke zurücklegt.

Lehrer Ja, warum denn?

Berthold Ja, weil die Höchstgeschwindigkeit erreicht ist, sie kann also nicht schneller werden.

Es deutet sich hier ein unterrichtlicher Konflikt an; zumindest ist ein Kommunikationskonflikt gegeben: Die Konzentration der Schüler auf das Problem des Übergangs von einer beschleunigten zu einer gleichförmigen Bewegung steht dem Ziel des Lehrers entgegen, idealtypisch zwischen einer gleichförmig beschleunigten Bewegung, die bei der Stahlkugel zumindest annähernd gegeben ist, und der gleichförmigen Bewegung des Papierhütchens zu trennen, um grundlegende Begriffe und einfache Gesetzmäßigkeiten entwickeln zu können. Dafür müßten die Schüler von den konkreten Randbedingungen des Luftwiderstands bei den Kugeln und der kurzen Beschleunigungsphase beim Papierhütchen absehen. Sie müßten die Phänomene also gedanklich "reinigen". Die Disposition zum Realisationsdenken bewirkt eher ein Festhalten an den tatsächlichen Gegebenheiten. Erst Tom sieht sich durch das Nachhaken des Lehrers veranlaßt, die "natürliche" Bedingung des Luftwiderstands zu explizieren - eine notwendige Voraussetzung für Fallunterscheidungen zwischen Betrachtungen mit und ohne Medium.

Lehrer Begründe mal diese Idee von der Maximalgeschwindigkeit. Du denkst jetzt an einen ganz bestimmten Vorgang, z.B. an die fallende Kugel?

Berthold Ja, z.B. an die Kugel. Wenn sie ihre Höchstgeschwindigkeit nach 10m erreicht hat, dann wird sie nicht mehr schneller.

Lehrer Was gibt es dazu zu sagen?

Tom Das ist schon richtig, wenn keine äußeren Einflüsse mehr auf die Kugel einwirken, abgesehen vom Luftwiderstand.

Lehrer Also keine neuen Einflüsse. Dann müssen wir überhaupt mal darüber nachdenken, welche äußeren Einflüsse die Bewegung beeinflussen können.

Albert Mit der Maximalgeschwindigkeit bin ich immer noch im Zweifel. Ich habe hier eine Formel herausgesucht, mit der man die Geschwindigkeit eines Körpers aus verschiedener Höhe fallend berechnen kann. Ich habe einmal die Geschwindigkeit, mit der ein Körper auf der Erde auftritt, mit der Höhe vom 5000m berechnet und mit der Höhe von 8000m. Bei

8000m war der Körper immer noch schneller als bei 5000m. Ich weiß jetzt nicht, ob es eine Maximalgeschwindigkeit gibt. Es ist ja eigentlich so, daß eine Maximalgeschwindigkeit erreicht wird. Aber dann ist die Formel nicht richtig.

Alberts Ausführungen zeigen, in welche Konflikte Schüler geraten können, wenn physikalische Aussagen wie "Alle Körper fallen gleich schnell" oder Formeln wie $v = (2gh)^{1/2}$ im Unterricht stehenbleiben, ohne daß ihr erkenntnisleitender Sinn und ihre impliziten Voraussetzungen ausdrücklich geklärt werden. Albert kommt zu dem Schluß, daß entweder die (an sich korrekte) Vorstellung der Maximalgeschwindigkeit falsch sein muß oder die Formel im Schulbuch. Die ideale Gestalt des freien Falls im Vakuum gehört zum Grundinventar der Physik. Die Entstehung des Eindrucks, die Physik behaupte schlichtweg, alle Körper fielen gleich schnell, wäre jedoch ebenso fatal wie der Eindruck, die Physik könne über den Fall im Medium eigentlich nichts aussagen, weil die Formeln dann nicht mehr stimmten. Die Vermittlung von idealen Gestalten und Realitätserfahrungen (Erfahrungen in der Anfaß- und Vorzeigerealität), auf die Schüler sich im Denkraumen Realisationsdenkens beziehen, ist eine wichtige Aufgabe, der sich der Physikunterricht zu stellen hat: Wozu braucht man Formeln wie $v = g \cdot t$, wenn doch keine Fallbewegung auf der Erde sich exakt an dieses Gesetz hält?

Lehrer Also, du hast eine Formel, die ist nicht begrenzt. Wenn man da immer größere Werte einsetzt, kommt auch eine höhere Geschwindigkeit heraus.

Ulf Wenn die Luft dünner ist, dann sind da ja auch immer weniger Luftmoleküle, dann wird der Widerstand ja auch kleiner.

Lehrer Von der Luft hatten wir bisher ja mehr oder weniger abstrahiert - oder insofern abstrahiert, daß wir kleine Kugeln nehmen wollen, von deren Luftwiderstand wir mehr oder weniger absehen können. - Wie erschlagen wir jetzt das Problem der Maximalgeschwindigkeit: Maximalgeschwindigkeit ja oder nein?

Im Gegensatz zur Lehreraussage ist keineswegs klar, daß vom Luftwiderstand abzusehen sei. Die Schüleräußerungen basieren gerade auf der Einbeziehung des Mediums. Der Unterschied zwischen einer Phänomenbetrachtung auf der Grundlage von Realisationsdenken und von abstrakt angenommenen idealen Bedingungen ist noch nicht herausgearbeitet worden. Die Aussagen von Ulf und Dietrich (s.u.) stellen Versuche dar, die Formel $v = (2gh)^{1/2}$ mit der Realität dadurch zu versöhnen, daß der Luftwiderstand zwar beibehalten, seine Auswirkungen aber von der Höhe über dem Erdboden abhängig gemacht werden. Kein Schüler zieht ernsthaft die Formel in Frage. Physikalische Formeln besitzen eine große Autorität (vgl. den Denkraum der "Formelfixierung"). Im Zweifelsfall stimmt das Gesetz und die Erfahrung muß überprüft werden. (Das gilt übrigens keines-

wegs nur für die Schule.)

Dietrich Ich würde sagen, die Geschwindigkeit der fallenden Kugeln nimmt immer zu. Die hat nicht irgendwann eine Geschwindigkeit erreicht, denn je näher sie dem Erdboden kommt, desto stärker wirkt sich auch die Erdanziehung auf sie aus. Dadurch beschleunigt die Kugel ständig. Sie erreicht nicht irgendwann eine Maximalgeschwindigkeit und fällt dann konstant runter. Das ist ja auch unsinnig. An welchem Punkt sollte die denn die Endgeschwindigkeit erreicht haben und warum?

Lehrer Das sind klare Fragen an Tom und Berthold.

Fank Vielleicht ist die Maximalgeschwindigkeit dadurch erreicht, daß die Kraft, die die Kugel nach unten zieht, am Anfang größer ist als die Reibungskraft durch die Luft. Die Reibungskraft wird dann im Laufe der Zeit größer und dann gleich groß, so daß der Körper dadurch dann die konstante Geschwindigkeit erreicht, so daß, wenn die Luftreibung nicht da wäre, der Körper tatsächlich immer weiter beschleunigen würde.

Frank klärt hier in überzeugender Weise den Sachverhalt. (Man bedenke, daß im Kurs über Kraft noch nicht gesprochen worden war.) Dies gelingt ihm durch eine gedankliche Zerlegung des Phänomens in verschiedene Einflußgrößen. Der Luftwiderstand wird nicht mehr als quasi natürlicher Phänomenrahmen betrachtet, sondern als bestimmender Faktor expliziert, der als Kraft gleichberechtigt neben die Anziehungskraft tritt. Dadurch wird der Idealtypus der gleichförmigen Bewegung im Vakuum denkbar. Die Vielfalt der untersuchten Bewegungen (Papierhütchen, leichte und schwere Kugeln) kann jetzt nach gemeinsamen einfachen Prinzipien erfaßt werden. Bemerkenswert ist das Kraftverständnis, das Franks Aussagen zugrundeliegt. Newtonsche Elemente (hier die Verknüpfung von resultierender Kraft mit Beschleunigung) haben einen gewissen Anteil am Clusterbegriff 'Kraft' auch vor Behandlung der Newtonschen Dynamik.

Lehrer Gut, jetzt haben wir die Sache noch etwas weiter unterschieden, nach tatsächlichen und abstrakten Vorstellungen. Frank hat gesagt: (...) (L. wiederholt Franks Aussagen sinngemäß). Beschränken wir uns jetzt vielleicht erstmal auf den einen Fall - den ohne die Berücksichtigung des Luftwiderstands.

Rolf Ja, es steht für mich eben an, was eben schon gesagt wurde. Wenn kein Luftwiderstand vorhanden ist, wird die Geschwindigkeit immer mehr zunehmen. Die Geschwindigkeit wird immer mehr in die unendliche Geschwindigkeit übergehen, aber sie wird sie nie erreichen. D.h. also, sie wird also nie parallel zur Senkrechtaxe von unserem gezeichneten Graphen gehen. Beziehen wir den Luftwiderstand mit ein, so wird es mit Sicherheit eine Maximalgeschwindigkeit geben.

Lehrer Unter Berücksichtigung des Luftwiderstands. - Es scheint jetzt zu einer vollkommen befriedigenden Antwort gekommen zu sein. Ist das vollkommen korrekt, was Rolf jetzt gesagt hat?

Tom Wir müssen jetzt wissen, wie stark nun die Anziehungskraft der Erde tatsächlich ist.

Lehrer Ja, das sind natürlich die Feinheiten.

Frank Die Abweichungen rühren ja daher, daß die antreibende Kraft nicht gleichbleibt. Die Kraft, die den Körper antreibt, bzw. die Erdanziehungskraft, wird ja größer. Wenn ich die Kraft erhöhe, ist es ja logisch, daß die Geschwindigkeit auch zunimmt. Bei einer gleichbleibenden Kraft wird die Geschwindigkeit aber bei einem bestimmten Punkt gleichbleiben.

Tom, Rolf und Frank zeigen die Fähigkeit zur bewußten Unterscheidung zwischen konkreten und abstrakt-idealen Betrachtungsweisen des gleichen Phänomens. Wenn im Unterricht nicht klar hervortritt, ob ein Phänomen als konkreter Einzelfall zu betrachten ist oder als gedanklich zu reinigende Veranschaulichung eines Idealtypus, neigen Schüler zum Realisationsdenken. Wenn die Intention des Lehrers darauf gerichtet ist, an dem Phänomen, unter Vornahme von Abstraktionen, einfache Gesetzmäßigkeiten zu entwickeln, können sich daraus Verständigungsschwierigkeiten ergeben. Diese Konflikte können, wie unser Beispiel zeigt, abgebaut werden, wenn die unterschiedlichen Betrachtungsweisen herausgearbeitet werden. Geschieht das nicht, so besteht die Gefahr, daß Lehrer und Schüler aneinander vorbeireden, ohne die Ursachen dafür zu sehen. Der Schritt des Übergangs von konkreten Experimenten zu allgemeinen Begriffen und Gesetzen wird im Unterricht oft nicht klar genug. Der damit verbundene Wechsel der Intention ist für Schüler nicht immer erkenn- und nachvollziehbar. Die Entwicklung allgemeiner Prinzipien erfordert die gedankliche Leistung der Exhaustion von akzidentellen Faktoren, während bei Überlegungen im Rahmen von Realisationsdenken diesen Faktoren besondere Beachtung geschenkt wird.

*

Aktivierung von Realisationsdenken durch qualitative Problemstellungen

Die Disposition zum Realisationsdenken wird besonders durch solche Problemstellungen virulent, bei denen qualitative Einschätzungen von Problemverläufen gefordert sind. Bei Aufgaben mit Zahlenwerten und Rechnungen kommen Interferenzen mit vorgestellten Realisierungen seltener vor, weil die vorgegebenen Größen häufig einen direkten Zugriff auf Formeln ermöglichen, ohne daß vorher eine Konzeptualisierung des Problems notwendig ist.

Dazu ein Beispiel: In einem Grundkurs wurden die Bewegungsgleichungen beim waagerechten Wurf an Demonstrationsexperimenten veranschaulicht und theoretisch hergeleitet. Anschließend wurden eine Reihe von Aufgaben mit willkürlichen Zahlenwerten gerechnet (Wurfweite, Abwurfgeschwindigkeit usw.). Kein Schüler brachte während dieser Doppelstunde den Aspekt eines Mediums ein, in dem sich die Bewegung abspielt. In der darauffolgenden Unterrichtsstunde wurde

der Abwurf einer Rettungsboje aus einem Flugzeug besprochen. Die Bewegung sollte zunächst in ihrem prinzipiellen Verlauf beschrieben werden. Sofort kamen Fragen von Schülern nach der Einbeziehung des Luftwiderstands. Es geht hier nicht darum, diesen Fragen ihre Berechtigung abzusprechen. (Man kann sogar bezweifeln, ob bei Vernachlässigung des Mediums das Beispiel des Bojen-Abwurfs überhaupt sinnvoll betrachtet werden kann.) Der Zweck der Aufgabe lag jedoch in der Illustration des Unabhängigkeitsprinzips. Das Beispiel war dafür willkürlich gewählt. Eine Simulation der Berechnung von Abwurfkoordinaten war nicht angestrebt. Es dauerte bei verschiedenen Schülern lange, bis sie den Bojenabwurf als mögliches Beispiel für einen waagerechten Wurf, so wie er in den vorhergehenden Stunden formal abgehandelt worden war, akzeptierten und von den "akzidentellen" Faktoren Luftwiderstand, Sog des Flugzeuges und Länge des Schiffes absahen.

*

Spekulative Verallgemeinerungen vollziehen sich im Realisationsdenken eng an Realitätserfahrungen

Realisationsdenken steht nicht im Gegensatz zu spekulativ-verallgemeinernden Schlüssen. In der Fallstudie haben wir gesehen, wie Schüler die These aufstellten, alle Körper erreichten beim Fall eine endliche Maximalgeschwindigkeit. Allerdings vollzieht sich die Spekulation im Realisationsdenken an beobachtbaren Phänomenen. Betrachten wir ein Beispiel aus einer Diskussion über eine angemessene Definition der Beschleunigung ($a = \Delta v / \Delta t$ oder $a = \Delta v / \Delta s$). Die Schüler hatten in Gruppenarbeit Schwefel- und Funkenspurmeßstreifen von beschleunigten Bewegungen nach beiden Beziehungen ausgewertet. Bei der experimentellen Grundanordnung (Beschleunigung von Wägelchen auf Fahrbahnen als schiefen Ebenen oder mittels angehängter Gewichtsstücke) wäre zu erwarten gewesen, daß die Werte für $a_i = \Delta v_i / \Delta t_i$ für je einen Meßstreifen in etwa konstant wären (entsprechend für $a_i = \Delta v_i / \Delta s_i$ fallend). Aus nachträglich nicht zu klärenden Gründen ("Dreckeffekte", methodische Auswertungsfehler, Rechenfehler) ergaben sich aber bei beiden Auswertungsverfahren sowohl konstante als auch fallende und steigende Werte. In die interessante Diskussion über eine sinnvolle Definition der Beschleunigung wurden Vermutungen darüber einbezogen, welcher Typ von Werten (konstant, steigend oder fallend) für die Beschleunigung bei den verwendeten Anordnungen eigentlich zu erwarten gewesen wäre.

Frank Also, die Beschleunigung müßte doch konstant bleiben. Es muß immer in einem bestimmten Zeitraum so und so viel schneller werden. Die

Beschleunigung kann ja nicht größer werden, dann müßte ja eine größere Kraft wirken.

Lehrer Ah, du verknüpfst das Auftreten der Beschleunigung mit einer Kraft?

Frank Ja.

Lehrer Und zwar in einem ganz bestimmten Zusammenhang: Du sagst, wenn eine Kraft wirkt - eine konstante Kraft, das war ja in unserem Fall dieses Gewicht da - dann muß auch die Beschleunigung die ganze Zeit über konstant bleiben. Das ist natürlich im Moment eine ganz schön weitgehende Spekulation oder Forderung an den Zusammenhang. O.k. wollen wir das einmal im Gedächtnis behalten.

Tom Zu Frank wollte ich erst einmal sagen, daß es grundsätzlich vielleicht etwas falsch ist. Vielleicht ist es besser, wenn man sagt "wirkende Kraft", denn die Kraft kann ja konstant sein. Das ist richtig. Aber die Kraft, die am Körper wirkt, das ist vielleicht - Wenn eine Kraft auf einen Körper wirkt, die ist meinerwegen konstant, dann erhält der Körper aber - wie soll man das sagen - der erhält dann praktisch nur die wirkende Kraft. Ich wollte nämlich sagen, da komme ich jetzt drauf zu sprechen, daß die Beschleunigung normalerweise monoton fallend sein müßte, denn die Beschleunigung wird mit steigender Geschwindigkeit doch immer kleiner. Der Körper erfährt mit steigender Geschwindigkeit eine immer kleinere Beschleunigung.

Lehrer Unter welchen Bedingungen soll das deiner Meinung nach so sein? Also, wenn der Körper von einer zeitlich konstanten Kraft beschleunigt wird, dann wird die Beschleunigung immer kleiner, oder?

Tom Ja, das stimmt.

Frank und Tom verfolgen beide sinnvolle theoretisch-spekulative Ansätze, die angesichts des frühen Zeitpunktes im Kurs in ihren dynamischen Aspekten erstaunen lassen. Frank meint, bei gleicher Kraft müßten auch gleiche Geschwindigkeitszuwächse in gleichen Zeiten erfolgen. Toms Modell bezieht von vornherein Reibungskräfte ein, die mit der Geschwindigkeit steigen, so daß es zu einer Abnahme der "wirkenden" (resultierenden) Kraft kommt und damit zu einer Abnahme der Beschleunigung. Beide Überlegungen sind physikalisch vollkommen korrekt. Dennoch haben sie einen wesentlichen Unterschied: Sie führen zu unterschiedlichen Prototypen von beschleunigten Bewegungen. Während Franks Annahme zur gleichförmig beschleunigten Bewegung bei konstanter Kraft führt, mündet Toms Ansatz in eine Art Relaxationsbewegung als Musterbeispiel. Eine Wahl zwischen den beiden Ansätzen kann nur auf einem Entschluß beruhen. Galilei hat aus Gründen der "Einfachheit" und der "Plausibilität" (vgl. Punkt D.3.4) diejenige beschleunigte Bewegung zum Idealtypus genommen, "bei der in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeiten hinzukommen" (Galilei 1637, 155). Galileis Wahl erfolgte entgegen der Tatsache, daß eine solche Bewegung nirgends vorfindbar ist (was Galilei an anderer Stelle selbst sagt). Er hatte große Mühe, den Bewegungstyp in seinen Fallrinnen-Experimenten näherungsweise zu realisieren. Dennoch (oder gerade deshalb?) erwies sich die Festlegung für die Theorie

der Bewegungen als äußerst produktiv. Toms Musterbeispiel wäre für einen Einstieg in die Begriffs- und Theoriebildung zu beschleunigten Bewegungen weniger geeignet, obwohl es enger an tatsächlichen Bewegungverläufen orientiert ist. Die Relaxationsbewegung steht hier am Anfang der Auseinandersetzung, während sie bei Galilei den Endpunkt darstellt. Galilei konnte die Relaxationsbewegung zwar qualitativ richtig beschreiben, mangels adäquater mathematischer Verfahren gelang ihm eine gesetzmäßig-quantitative Erfassung nicht mehr.

*

Zusammenfassung

Denkrahmen 1: Realisationsdenken

D1: Schüler durchdenken Probleme, die als Gedankenexperimente konstruiert sind, oder solche, für deren Bearbeitung bestimmte Abstraktionen vorausgesetzt sind, in vorgestellten alltagsnahen Realisierungen des Prozeßverlaufs.

Merkmale und Aktivierungsformen:

- Uminterpretation von Aufgabenstellungen, Einbeziehung von eigentlich zu vernachlässigenden Randbedingungen, insbesondere von Reibungseffekten.
- Unterschwellig fungierender oder direkt geäußelter Widerstand gegen die Vornahme von Abstraktionen, die im Gegensatz zu Realitätserfahrungen stehen.
- Die Aktivierung von Realisationsdenken erfolgt eher durch qualitative Problemstellungen ("Denkaufgaben") als durch solche, in denen die Berechnung von Zahlenwerten im Vordergrund steht ("Rechenaufgaben").
- Spekulativ-verallgemeinernde Aussagen orientieren sich im Realisationsdenken nicht an gedanklich gereinigten Phänomenen, sondern direkt an Phänomenen der Anfaß- und Vorzeigerealität.

Bedeutung und Folgerungen

Das Vorverständniselement behindert den Zugang zur konstitutiven Methode der Physik, Wirklichkeit auf der Grundlage theoretischer Naturentwürfe und dafür konstruierter "reiner" Phänomene zu analysieren. Es besteht die Gefahr der Entstehung von Lehr-/Lernkonflikten aus unterschiedlichen Sichtweisen eines Phänomens als konkret bedeutsamer Einzelfall, den es genau zu erkunden gilt oder als willkürlich gewählte Illustration eines allgemeinen Prinzips. Der Abbau dieser Kommunikationskonflikte zwischen Lehrer und Schülern ist über die Explizierung der jeweiligen Funktion der behandelten Phänomene möglich. Die Kritik von Schülern an bestimmten vereinfachenden Annahmen kann auch als positives Zeichen der Hoffnung gewertet werden, daß Physik zum Verständnis der eigenen Erfahrungswelt beiträgt. Schüler besitzen die Fähigkeit zur Unterscheidung zwischen konkret-erfahrungsgebundenen und abstrakt-idealisierten Betrachtungen. Wichtig ist das Erkennen des Sinns idealer Gestalten und reiner Phänomene für den Erkenntnisfortschritt und des Nutzens theoretischer Konstrukte für die Deutung von Realerfahrungen. Im Physikunterricht findet die Vermittlung dieser Aspekte zu wenig Beachtung.

B.3.2.1.2 Allgemeines Interesse 1: Interesse an Phänomenen an sich

Denkrahmen 2: Aufgabe der Physik: Realitätserfahrungen erklären

A1: Schüler interessieren sich für Phänomene an sich. Sie widmen sich eher genauen Untersuchungen mit spezifischen Aussagen über Einzelphänomene als Überlegungen im Hinblick auf die Bildung allgemeiner Begriffe/Prinzipien/Theorien.

D2: "Physik hat die Aufgabe, Realitätserfahrungen genau und am Einzelfall zu erklären."

Grobstruktur und Bedeutung der Vorverständniselemente

Das Interesse an der genauen Betrachtung von Einzelphänomenen, weniger am Erwerb allgemeingültiger Erklärungsschemata, und die Vorstellung, Gegenstand und Aufgabe der Physik sei die genaue Erklärung der Vorgänge in der natürlichen und technischen Umwelt, stehen in einem engen Zusammenhang. Das postulierte Interesse an Einzelfallbetrachtungen scheint auf den ersten Blick nicht problematisch für den Erwerb physikalischer Kompetenz zu sein. Auch die Physik befaßt sich mit genauen experimentellen und theoretischen Studien bestimmter Effekte. Aber sie tut das in der Phase der Begriffs- und Theoriebildung als Suche nach paradigmatischen Beispielen, an denen eine Theorie erarbeitet oder exemplifiziert werden kann. Erst in der angewandten Physik und der Technik dominiert der faktische Wert der Ergebnisse für den untersuchten Einzelfall. Klassische physikalische Phänomene, wie der freie Fall, das Pendel oder der Wurf, sind wissenschaftslogisch Illustrationen von Begriffen und Prinzipien. Die gleiche Rolle spielen die genannten Proto-Phänomene im Unterricht. Der Physikunterricht auf der Sekundarstufe II vermittelt die physikalische Theoriebildung. Selten steht eine praktisch relevante offene Fragestellung im Blickpunkt. Die gegensätzlichen Intentionen von Theoriebildung und Theorieanwendung werden, wie wir bereits beim Vorverständniselement D1 ("Realisationsdenken") bemerkt haben, zu wenig thematisiert.

Auf die Lehr-/Lernkonflikte, die sich daraus ergeben können, haben wir ebenfalls schon beim Element D1 hingewiesen. Es bleibt den Schülern oft verborgen, worauf der Lehrer eigentlich hinauswill und warum manche Gesichtspunkte, die sie einbringen (typischerweise Reibungseffekte wie Luft-, Gleit- und Rollwiderstände) so wenig Beachtung finden oder als vernachlässigbare "Dreckeffekte" bezeichnet werden, die mit dem "Kern" der Sache nichts zu tun hätten.

Feinstruktur und Diskussion der Elemente an Beispielen

Themenwahl und Vorgehensweise im SVU

Als Indiz für Schülerinteressen kann die Art der Themenwahl in einem schüler-
vorverständnisorientierten Unterricht (SVU) gelten. Der erste Beleg für das Ele-
ment AII stützt sich auf die Auswertung eines SVU zum Rahmenthema "Wovon
hängt die Beschleunigung ab?" (Einführungskurs, 11. Klasse), der auf die Kine-
matik aufbaute (Begriffe, Meßverfahren und graphische Darstellungen von
Bewegungsverläufen). Der SVU sollte die Schüler zum Kraftbegriff hinführen.
Die Gruppen wählten folgende Fragestellungen:

- Wie hängt die Beschleunigung eines Experimentierwagens auf einer geneigten
Fahrbahn von seinem Gewicht ab?
- Wie hängt die Beschleunigung einer batteriebetriebenen Modelllokomotive
vom Anstieg der Schienen und von einem angehängten Gewichtsstück ab?
- Wie hängt die Beschleunigung eines Körpers vom Luftwiderstand ab? (Die
Schüler befestigten dazu ein Papiersegel an einem Experimentierwagen. Der
Wagen wurde mittels eines Föns abgebremst. Unter anderem wurde gemessen,
wie der Wert der Beschleunigung von der "Fönstärke", bzw. vom Abstand
Segel - Fön abhing.)
- Wie hängt die Beschleunigung eines Wagens von der Oberfläche der Fahrbahn
ab? (Dazu wurde verschieden grober Sand in die Führungsschiene einer
Schwefelspurfahrbahn gestreut.)
- Wie hängt die Beschleunigung von der Ablaufhöhe auf einer geneigten Fahr-
bahn ab?

Auf ihre speziellen Fragestellungen fanden die Schüler jeweils interessante, teils
qualitative, teils quantitative Antworten. Die Beschleunigung wurde mit verschie-
denen, der jeweiligen Situation angepaßten Parametern ins Verhältnis gesetzt:
"Fönstärke", "Motorstärke", "Körnigkeit des Sands", Gewicht, Ablaufhöhe. Die
Schüler waren mit Verlauf und Ergebnissen ihrer Untersuchungen sehr zufrieden.
Sie hatten ihre Fragestellungen konkreten Lösungen zugeführt. Ansätze für die
Herstellung eines Zusammenhangs von Beschleunigung mit einem allgemeinen
Kraftbegriff waren in den Berichten der Gruppen nicht erkennbar.

Der Lehrer erläuterte daraufhin Unterschiede zwischen physikalischen und all-
tagspraktischen oder technischen Zielsetzungen, bzw. Interessen. Tenor: Während
es in der Alltagspraxis und in der Technik um die Erarbeitung von Lösungen
für spezielle Probleme gehe, gelte das Interesse der Physik der Aufstellung
allgemeiner Gesetzmäßigkeiten und Begriffe. Dabei werde in Kauf genommen,
daß nicht alle speziellen Einzelfälle im Detail mit direkt umsetzbaren Konse-
quenzen vorhergesagt werden könnten. Der Vorteil physikalischer Erkenntnisse
liege darin, daß man mit wenigen allgemeingültigen Begriffen und Gesetzen

eine Vielzahl unterschiedlicher Phänomene erfassen und nach ihrer prinzipiellen Struktur erklären könne. Die Ausführungen fanden bei den Schülern große Beachtung. Sie hatten die Zielsetzung der Physik eher in der genauen Untersuchung einzelner Phänomene gesehen. Physik und Technik waren kaum unterschieden worden. Vor diesem Hintergrund wurden rückblickend Zielsetzungen, Vorgehensweisen und Ergebnisse im SVU reflektiert. Die Schüler äußerten dabei, daß bei ihnen ein physikalisches Interesse, wie es vorher umschrieben worden war, nicht als Antrieb fungiert habe.

Durch die Explizierung wissenschaftstheoretischer Aspekte sollte die Einführung eines so abstrakten Begriffs, wie ihn das Newtonsche Kraftkonzept darstellt, in einen erkennbaren Zusammenhang mit Grundmerkmalen physikalischer Erkenntnistätigkeit gestellt werden. Daß die unterrichtliche Behandlung fruchtbare Aufnahme fand, die durch die Reflexion der eigenen Vorgehensweise befördert wurde, zeigte sich in der anschließenden Klausur. Folgende Frage war zu beantworten:

"Beschreiben Sie die Unterschiede von Alltagsdenken und physikalischem Denken mit zwei Beispielen zu der Gleichung $a = F/m$! Benutzen Sie dabei die Gegensätze 'allgemein - speziell', 'genau - ungenau', 'definierte Begriffe - anschauliche Begriffe'!"

Die Antworten lauteten durchgängig, Physiker suchten nach allgemeinen Gesetzen, sie seien nicht so sehr an Spezialfällen interessiert. Physikalische Aussagen seien im Vergleich zu denen eines "Alltagsmenschen" oder "Technikers" ungenauer im speziellen Fall. Im Alltagsleben wolle man "konkrete Handlungen verbessern". Der Physiker büße an Anschaulichkeit gegenüber einem "Alltagsdenker" oder "Techniker" ein, da er definierte Begriffe verwende: "Ausgebildete Physiker kann man manchmal kaum verstehen, wenn sie einem was erklären wollen."

Schüler aus diesem Kurs nahmen acht Monate später als einzige im Abschnitt C des Tests VWP Differenzierungen zwischen Physik und Technik vor:

"Die Physik kann nicht für jeden Vorgang eine Formel parat halten, sondern muß Regelmäßigkeiten finden, die die allgemeinen Formeln zusammenfassen."

"Das Wesen der Physik liegt meines Wissens nach in der Erklärung allgemeiner Dinge. Das Wesen der Technik dagegen z.B. in der Ermittlung spezieller Formeln."

*

Ein schönes Beispiel für sorgfältige Detailstudien kann einem SVU zum Thema "Stoßvorgänge" (Grundkurs 11. Klasse) entnommen werden. Kurt und Wilfried wählten als Untersuchungsthema: "Wie stark verformen sich Knetgummikörper

unterschiedlicher Form beim Aufprall auf ein Hindernis?" Mit großer Akribie und mit viel Wert auf Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse wurden Knetgummikörper geformt (Rundstäbe, Kugeln, Quader, Kegel, Pyramiden gleicher Masse) und an der Stirnseite eines Wagens befestigt, der eine schiefe Ebene herunterrollte und gegen einen Stahlklotz prallte. Gemessen wurde die Verformung (Stauchung) der Körper, die mit einer bestimmten Geschwindigkeit aufprallten. Die Experimente ergaben eine Rangfolge unter den Körpern nach dem Maß der Stauchung. Im Anschluß wurden einige Überlegungen zur Bedeutung der Ergebnisse für Knautschzonen von Autos angestellt. Die Gruppe hatte ursprünglich aus Streichhölzern verschiedene Konstruktionen von Knautschzonen aufbauen wollen, um deren Verformung beim Aufprall zu untersuchen (Wie baut man am besten eine Knautschzone?). Überlegungen zur Einführung neuer Größen für die Beschreibung von Stoßvorgängen wurden nicht angestellt (andere Schüler kamen z.B. auf "Aufprallkraft"). Das Interesse galt eindeutig der Untersuchung eines speziellen Phänomens. Kurt und Wilfried äußerten sich über ihre Arbeiten in der Nachbefragung zum SVU sehr befriedigt. Sie hätten in der Unterrichtseinheit viel gelernt, weil sie ein Thema bearbeitet hätten, das sie persönlich interessiert habe.

*

Ein Gegenbeispiel zu A11/D2 kann aus einem anderen SVU geschildert werden (gleiches Thema "Stoßvorgänge", Leistungskurs 11. Klasse). Ausschnitte aus der Phase der Suche nach einer Fragestellung zeigen, wie die Schüler der hier gewählten Gruppe den Gesichtspunkt der Verallgemeinerbarkeit der gewinnbaren Ergebnisse in die Entscheidung einbeziehen:

- Markus Wenn man einen Nagel in eine Wand bohrt, dann hat der doch einen bestimmten Weg, den er in der Wand steckt. Ein paar Zentimeter ist der drin. Kann man nicht das Verhältnis der gewissen Tiefen mit einer Kraft gleichsetzen? Daß irgendeine Kraft im selben Verhältnis - ich meine, das muß ja so sein, nicht?
- Heiko Vielleicht könnte man das auch irgendwie machen, wie man die Kraft überträgt. Wenn man hier einen Widerstand hat und hier fährt einer gegen, wie weit der dann noch weiterrollt. Wieweit diese Kraft durch den Klotz durchgeht. Das ist so was ähnliches wie bei diesem Managerspiel. Da läßt du eine Kugel gegenprallen und hinten geht eine los.
- Ulf Das finde ich gut. Der Wagen rollt also weiter und man untersucht, wieviel Kraft in dem Klotz verlorengeht.
- Markus Ja gut, dann ist der Vorgang aber praktisch einmalig.
- Heiko Du kannst das ja mit verschiedenen Klötzen machen und verschiedenen Kräften.

Es geht den Schülern um 'Kraft' (im Sinne des Clusterbegriffs), also um einen allgemeinen Begriff. Die Schüler suchen nach beispielhaften Situationen, in denen man "Kraftübertragung" ergründen kann. Spezielle Aussagen hält insbesondere Markus nicht für ausreichend. Das zeigt sich bei der Vorstellung der geplanten Untersuchungsthemen:

- Heiko Wir wollen untersuchen, wie die Kraft durch feste Gegenstände auf bewegliche wirkt. Also ob die Kraft erhalten bleibt, oder ob sie dabei verlorenght. Dazu können wir die Luftkissenbahn nehmen. Kann man das darauf auch mit Kugeln machen?
- Lehrer Auf der Luftkissenbahn gehen keine Kugeln, da muß man Wagen nehmen. - Gut, also hier einen Schwamm als Übertragungsgegenstand zwischen den beiden Wagen? So als ein Beispiel?
- Heiko Ja verschiedene - also einen Holzklötz oder einen anderen Wagen vielleicht oder irgendwas. Bei Kugeln hätte ich daran gedacht, daß wir da noch eine dritte Kugel zwischen festmachen, aber das geht ja auf der Schwebbahn nicht.
- Markus Aber das mit dem Gegenstand ist doch nicht so vorteilhaft, weil wenn man jetzt einen Schwamm nimmt, dann bekommt man doch nur Daten des Schwamms, oder so. Man kann das doch nicht verallgemeinern (Hervorhebung d.Verf.). Es sei denn, man beschränkt sich auf einen Schwamm und nimmt nicht mehrere unterschiedliche Materialien.

*

Genaue Beachtung experimenteller Randbedigungen

In SVUs wirkt sich das Interesse an 'Phänomenen an sich' bei der Themenwahl aus. Im Klassenunterricht tritt das Vorverständniselement dadurch in Erscheinung, daß Schüler die experimentellen Randbedingen demonstrierter Vorgänge genau im Auge behalten. Das kann dazu führen, daß der "Kern der Sache", so wie er vom Lehrer gesehen wird, dahinter zurücktritt. Es bestehen hier enge Beziehungen zum Realisationsdenken (Denkrahmen 1). Man könnte einige der folgenden Beispiele auch dort zuordnen.

Aus einer Stunde, in der Funkenspuraufzeichnungen von Fahrbahnexperimenten zum Zusammenhang von Kraft, Masse und Beschleunigung ausgewertet wurden, stammt die nächste Illustration. Die Auswertung der Meßstreifen erfolgte in Gruppen. Die Ergebnisse werden im Klassenverband vorgetragen:

- Annim Wenn dieselbe Kraft die doppelte Masse beschleunigen soll, dann ist die Beschleunigung halb so groß.
- Lehrer Annim hat jetzt einen bestimmten Zusammenhang herausgenommen. Wie kann man den Zusammenhang zwischen Kraft, Masse, Beschleunigung systematisch herleiten? - (Pause) - Wie ist der Zusammenhang zwischen den drei Größen?

Jörg Die Kraft ist die Beschleunigung. Also, die Kraft ist die Größe der Beschleunigung. Die Masse ist die Größe der Reibung, also wie stark das bremst.

Lehrer Reibung? Wir haben doch nun extra eine Luftkissenfahrbahn genommen.

Jörg Aber wenn mehr Gewichtsstücke auf dem Gleiter drauf sind - Wir mußten dann ja, um die gleiche Beschleunigung zu erreichen, auch mehr Gewichtsstücke dranhängen. Durch die Gewichtsstücke auf dem Gleiter wird der ein bißchen runtergedrückt, der kriegt dann ein bißchen Bodenberührung.

Lehrer Nein, das ist nicht so. Das pustet ganz schön. Was meinst du mit dem Begriff "Reibung"? Da müssen wir ja doch mal ein bißchen weitersehen. Also irgendwas ist da. Das sieht man ja, das wird langsamer. Aber Reibung -

Der Punkt wird nicht weiter vertieft, weil andere Gruppen ihre Ergebnisse vortragen. Für den Lehrer kommt Jörgs Aussage überraschend: "Reibung? Wir haben doch nun extra eine Luftkissenfahrbahn genommen." Sicherlich beruhen Jörgs Aussagen mit auf dem Präkonzept der Masse-Reibungs-Kopplung (vgl. Punkt B.3.3.2.5). In seiner zweiten Aussage zeigt sich die genaue Reflexion der experimentellen Bedingungen. Jörgs Argumentation, daß durch Erhöhung des Gleitergewichts die Reibung zunimmt, ist im Prinzip berechtigt (Erhöhung der inneren Reibung im Luftkissen). Für den Lehrer liegt lediglich eine Unvollkommenheit des Phänomens vor, von der man absehen muß, wenn man den allgemeinen Zusammenhang zwischen Kraft, Masse und Beschleunigung an einem einfachen paradigmatischen Beispiel erarbeiten will. Damit wird das Dilemma deutlich: Das Experiment kann nur als Idealfall gesehen werden, wenn man bereits über das Gesetz verfügt, für das die Anordnung konstruiert ist, oder wenn man es spekulativ vorwegnimmt. Ein genaues Hinsehen auf Randbedingungen kollidiert mit der Intention des Versuchs.

*

Als Anordnung für Beschleunigungsversuche wurde in einem Leistungskurs vorgeschlagen, im Flur eine ca. 8m lange Bahn aus Schienen auszulegen, auf der mittels eines Gewichts, das im Treppenhaus hinuntersinkt, ein Wagen beschleunigt werden sollte. Zur Begründung der Anordnung wurde vorgebracht, die vorhandenen Experimentierfahrbahnen seien zu kurz. Versuche mit langen Fahrbahnen seien realistischer, weil der Wagen auf der langen Strecke seine Endgeschwindigkeit erreiche, was bei den Fahrbahnen aus der Sammlung nicht der Fall sei. Die Frage, ob und unter welchen Bedingungen bei einer beschleunigten Bewegung eine endliche Maximalgeschwindigkeit erreicht wird, wurde von Schülern wiederholt aufgebracht. Z.B.:

Oswald Wenn die Bahn lang genug wäre, dann würden die Waggonen unabhängig von ihrem Gewicht gleiche Endgeschwindigkeiten erreichen.

Schüler Nein, bei schweren Wagen wirkt das Gewicht mehr auf die Achsen. Der würde daher nicht so schnell.

Die Frage fand bei den Schülern mehr Beachtung als die Suche nach einer allgemeingültigen Definition von Beschleunigung. An diesem Beispiel zeigt sich die Komplementarität des Interesses am 'Phänomen an sich' und des Realisationsdenkens (Denkrahmen D1).

*

Vorstellungen von Gegenstand und Aufgabe der Physik

Wir wollen uns nun verstärkt Denkrahmen D2 zuwenden, nach dem die Physik die Aufgabe hat, Realitätserfahrungen im Einzelfall genau zu erklären. Diskutierbar wird diese Vorstellung, die ja gleichzeitig eine Forderung an die Physik ist, wenn man eine Gegenthese aufstellt: "Physik hat die Aufgabe, für die Vielfalt der in Natur und Technik auffindbaren und der im Labor präparierbaren Phänomene umfassend-allgemeingültige ordnende Theorien bereitzustellen." Die Diskussion kann sich dann an der Frage entzünden, was die wesentliche Zielrichtung der Physik ist: Geht es primär um genaue Einzelfallklärungen oder geht es mehr um den kategorialen Erklärungsrahmen? Daß wir den zweiten Standpunkt einnehmen, haben wir bereits an verschiedenen Stellen ausgeführt. Man mag für die Praxis der Wissenschaft Physik eine solche Unterscheidung als schwer durchführbar oder als nicht sinnvoll erachten (auch der Verfasser sieht in manchen Gebieten fließende Übergänge) - beim Physikunterricht auf der Sekundarstufe II liegt der Schwerpunkt eindeutig bei den Begriffen/Prinzipien/Theorien. (In den Bremer Kursleuten werden z.B. verschiedenste Phänomenbereiche in einem Kurs "Felder" unter eindeutig strukturellen Aspekten zusammengefaßt.)

Schülern, die sich physikalische Theorien erst erarbeiten müssen, kann die Intention der Kursplanungen und der eingesetzten Experimente nicht unter Struktur-Gesichtspunkten einsichtig sein. Sie erleben die Physik zunächst als Abfolge bestimmter Phänomene. Das allgemeine Interesse AII und Denkrahmen D2 stehen mit dieser Erfahrung in gutem Einklang. Die Ausrichtung des Unterrichts auf Begriffe und Theorien erfordert von den Schülern eine Umorientierung. Zitieren wir dazu Künzli:

Jeder konkrete und praktische Fall in bestimmter Situation soll immer nur als Fall von etwas Allgemeinem verstanden werden. (...) Jede konkrete Lösung eines Problems ist bloß Anlaß seine Verallgemeinerungs-

fähigkeit zu überprüfen. Dies scheint mir die schwierige Zumutung zu sein, wenn unsere Schüler in der Schule Wissenschaft lernen sollen. (Künzli 1982, 7f; Hervorhebungen im Original)

Das bedeutet konkret: Die für die Mechanik ausgewählten Phänomene erlangen ihre Bedeutung erst im Hinblick auf die Theorie. Bei der empirischen Basis handelt es sich um einen Satz paradigmatischer Beispiele. Den Schülern ist diese Bedeutung aber nicht offenbar; sie kann es nicht sein, da die Theorie an den gleichen Beispielen erst erarbeitet werden muß. Die wissenschaftslogischen Gründe für Phänomenauswahl und -präparation werden im Unterricht meist unterschlagen. Auch der Lehrer muß sich ihrer nicht bewußt sein. Typische Hilfsargumente, wie "Wenn man den Luftwiderstand einbezieht, werden die Gesetze zu kompliziert" geben die Gründe für bestimmte Abstraktionen nur unvollkommen wieder.

*

Die beiden folgenden Aussagen wurden 449 Schülern im Test VWP (Vorstellungen über die Wissenschaft Physik) zur Bewertung vorgelegt:

- A1) Die Tätigkeit des Physikers besteht darin, Vorgänge, denen wir im Alltag begegnen, systematischer, genauer und gezielter zu untersuchen, als der "Alltagsmensch" das kann.
- A5) Die Physik hat das Bestreben, allgemeine Gesetzmäßigkeiten aufzustellen. An speziellen Aussagen über konkrete Vorgänge ist sie wenig interessiert.

Hier die Ergebnisse:

A1: + 91%	- 4%	? 4%	+ : Zustimmung
A5: + 19%	- 62%	? 19%	- : Ablehnung
			? : keine Entscheidung
			N = 449

Die überwältigende Zustimmung zu A1 wird nicht überraschen. Soweit sie sich auf "genaue Untersuchung von Alltagsphänomenen" als Tätigkeit des Physikers bezieht, wird der Physikunterricht auf der Sekundarstufe II eine damit verbundene Vorstellung von den Schwerpunkt der Unterrichtsinhalte enttäuschen (Stichwort "Strukturorientierung"). Vermutlich liegt ein wesentlicher Grund für die positive Bewertung des Items in der Beschreibung der Physik als "systematisch, genau und gezielt" vorgehende Wissenschaft. Man kann den Gehalt der Aussage so verstehen: "Physik ist eine für die Menschen nützliche Tätigkeit".

Es besteht keine statistisch signifikante Korrelation zwischen den Bewertungen der Items A1 und A5. Das PRE-Maß (proportional reduction in error measures;

vgl. Benninghaus 1982, 125ff) beträgt $\lambda_{\text{symmetrisch}} = 0.002$. (Der Fehler bei der Vorhersage der Verteilung einer Variablen verringert sich demnach bei Kenntnis der Verteilung der anderen um 2%.) Die Schüler haben den Gegensatz zwischen "genauen Einzelfallbetrachtungen" in A1 und "Aufstellung allgemeiner Gesetze" in A5 offensichtlich nicht wahrgenommen.

Die Ergebnisse zu Item A5 sind klarer interpretierbar und daher interessanter. Die Aussage hat zwei Teile, die möglicherweise gegensätzlich beurteilt wurden. Dafür spricht der relativ hohe Anteil der Schüler, die sich nicht entscheiden konnten (19%). Es ist denkbar, ein Streben der Physik nach allgemeinen Gesetzmäßigkeiten zu konstatieren und ihr dennoch ein bedeutendes Interesse an Spezialuntersuchungen zuzumessen. Aus dem Antwortverhalten können Schlüsse auf denjenigen Teil des Items gezogen werden, der bei der Gesamtbewertung überwog. Nur 19% der Schüler stimmen der Aussage zu, wobei vermutlich der 1. Satz den Ausschlag gab. Auf eine gleichzeitige Bejahung des zweiten Teils kann nicht geschlossen werden. Einige Schüler machten auf dem Fragebogen kenntlich, daß sie dem ersten Teil zustimmten, den zweiten jedoch ablehnten. Die Ursache für die vorherrschende Ablehnung des Items (62%) sehen wir eher im zweiten Satz. Als Ergebnis bleibt festzuhalten, daß die Mehrzahl der Schüler im Zweifelsfall der Gewinnung spezieller Aussagen über konkrete Vorgänge größere Bedeutung für die physikalische Erkenntnistätigkeit einräumt als dem (sicherlich nicht verneinten) Bestreben nach allgemeinen Gesetzmäßigkeiten.

*

Unter Punkt C des Tests VWP wurde der Themenkreis "Gegenstände und Ziele der Physik" zur offenen, selbstformulierten Stellungnahme vorgelegt. Es sollte zum folgenden fiktiven Dialog Stellung genommen werden:

Jens: "Ich finde, die ganze Physik nützt einem nicht viel für das Verstehen tatsächlicher Vorgänge. Sie beschäftigt sich immer nur mit Laborexperimenten, reibungsfreien Bewegungen ohne Luftwiderstand, Massepunkten und sowas. Wo hat man so etwas schon in der Wirklichkeit? Man könnte noch nicht einmal genau berechnen, wohin sich ein Ball bewegt, den man über Kopfsteinpflaster rollt. Die realen Vorgänge sind viel zu kompliziert, als daß man sie mit den Gesetzen der Physik beschreiben könnte. Und außerdem kommt man im Alltag auch gut ohne sie zurecht."

Ralf: "So kann man das nicht sagen. Immerhin hat man mit physikalischen Gesetzen die Flugbahn einer Rakete zum Mond berechnet. Oder man kann z.B. die Entstehung von Ebbe und Flut erklären. Die Physik beschreibt eben mehr global, 'was die Welt im Innersten zusammenhält'. An so speziellen Sachen, wie der Rollbahn eines Balles über Kopfsteinpflaster, ist sie gar nicht interessiert. Ich meine schon, daß Physik einem hilft, seine Umwelt besser zu verstehen."

In der untenstehenden Tabelle sind die wichtigsten wiederkehrenden Elemente der Stellungnahmen aufgelistet. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Zahl der Schüler, die eigene Stellungnahmen abgaben und nicht einfach schrieben "Jens/Ralf hat Recht" (223 von insgesamt 449 Schülern). Es muß betont werden, daß die Prozentangaben keine Aussagen über die Verteilung der einzelnen Standpunkte in der Gesamtstichprobe ermöglichen. Sie zeigen vielmehr, welche Gesichtspunkte den Schülern mehr und welche ihnen weniger eingefallen sind.

Antwortelement	N :	Ges.	Mä.	Ju.	GK	LK
1) Die Physik trägt zum Verständnis der Umwelt bei.		51%	50%	51%	50%	51%
2) Ich habe schon einmal persönlich von physikalischen Kenntnissen profitiert.		4%	7%	3%	5%	2%
3) Der Normalbürger kann mit Physik im Alltag wenig anfangen.		6%	5%	7%	7%	6%
4) Man kommt im Alltag auch ohne Physik zurecht, aber sie ist nicht unnütz.		8%	13%	6%	7%	8%
5) Die Physik ist für das Verstehen der Umwelt nützlich. Aber im Physikunterricht lernt man darüber nichts.		4%	9%	3%	6%	2%
6) Wer meint, Physik nütze im Alltag nichts, hat sich zu wenig mit ihr beschäftigt.		11%	14%	10%	10%	12%
7) Der Physikunterricht sollte einen stärkeren Bezug zur Natur/zum Alltag haben.		14%	27%	10%	20%	5%
8) Mich interessiert die Physik an sich, auch ohne direkten Nutzen im Alltag.		4%	2%	4%	2%	6%
9) Die Physik beschäftigt sich <u>besonders</u> mit speziellen Phänomenen.		4%	4%	4%	2%	6%
10) Die Physik ist <u>auch</u> an speziellen Phänomenen interessiert.		19%	17%	19%	17%	22%
11) Die Physik befaßt sich mehr mit allgemeinen Gesetzmäßigkeiten. Spezielle Einzelfälle sind nicht so wichtig.		5%	4%	5%	3%	8%
12) Die Laborwelt ist eine Nachbildung der Natur unter vereinfachten Bedingungen.		11%	5%	13%	9%	15%
13) Physik ist eine entscheidende Grundlage unserer Zivilisation.		17%	5%	20%	11%	26%

Mä. : Mädchen; Ju. : Jungen; GK : Grundkurse; LK : Leistungskurse; Ges. : Gesamt

Viele Antwortelemente sind für den hier diskutierten Denkrahmen interessant. Die Schüler bejahen einen Beitrag der Physik zum Verständnis der Umwelt. 'Ralfs' letzter Satz wird in rund 50% der Stellungnahmen aufgegriffen. Typische Begründungen lauten:

- Man operiert im Alltag mit Begriffen, die erst durch die Physik richtig geklärt werden: "Man braucht die Physik, um die Geschwindigkeit von Menschen, Auto, Zug etc. zu berechnen, z.B. um sich an die Richtgeschwindigkeit auf der Straße zu halten."
- Alltagsphänomene werden von der Physik erklärt: "Die Physik erklärt z.B., warum man in der Straßenbahn beim Bremsen nach vorne fällt."
- Physik erklärt die Funktionsweise von technischen Gegenständen: "Heute kommt überall Physik vor (z.B. Waagen, Raketen, Wetter, Flugzeug usw.)."

Zwischen Physik und Technik wird wenig differenziert. Beispiele für den Nutzen der Physik stammen oft aus der Technik:

"Viele Leute besitzen ein Auto und wollen es nicht immer gleich, wenn es kaputt ist, in die Werkstatt bringen. Deshalb muß man ein bißchen Ahnung von einem Automotor haben. Diese kann man sich doch nur in der Physik aneignen." (Schülerin, GK)

Aus den Antworten spricht ein Vertrauensvorschuß für die Physik. Ihr wird die Fähigkeit zugeschrieben, Realitätserfahrungen, besonders solche aus dem Bereich der Technik, im Detail zu erklären. Schilderungen eines direkten, persönlichen Nutzens physikalischer Kompetenz, wie im nächsten Zitat, sind jedoch selten.

"Mir hat die Physik schon mal geholfen, meine Umwelt besser zu verstehen. Und zwar haben wir gleich im ersten Halbjahr dieser Schule gelernt, daß Wasser Strom leitet, daß es also deshalb sehr gefährlich ist, ein Radio oder so auf den Badewannenrand zu stellen. Oder daß man nicht mit nassen Händen an eine Steckdose kommen darf. Ich finde, die Physik kann einem doch ganz schön häufig im Alltag helfen, seine Umwelt besser zu verstehen, allerdings nur, wenn man sich auch intensiv irgendwie damit beschäftigt." (Schülerin, GK)

Die zuletzt gemachte Einschränkung findet sich bei anderen Schülern wieder. Der Physik wird teilweise ein hypothetischer Nutzen eingeräumt, der erst bei intensiver Beschäftigung mit ihr eingelöst und der vom Physikunterricht nicht immer realisiert wird.

"Die Physik hilft schon, seine Umwelt besser zu verstehen, aber solche Sachen macht man weniger im Unterricht. Meist lernt man irgendwas aus der "Physik" und weiß gar nicht wozu. Das ist uninteressant." (Schülerin, GK)

Das Erkennen des Nutzens der Physik setze ein gewisses Interesse voraus. Mangelnder Einblick in die Physik, schlechter Schulunterricht oder gar Technikfeindlichkeit werden 'Jens' unterstellt. Nur wenige Schüler stimmen ihm ausdrücklich zu:

"Wie Jens finde ich, daß die Physik ziemlich theoretisch ist. Die zu starke Verallgemeinerung schränkt die Verwendbarkeit von physikalischen Gesetzmäßigkeiten im Alltag ein." (Schüler, LK)

Die Frage, ob Physik sich nach Meinung der Schüler mit der genauen Untersuchung spezieller Einzelfälle befaßt, kann aus den Ergebnissen des Tests nicht klar beantwortet werden. Zwar meinen nur wenige Schüler (4%), die Physik beschäftige sich besonders mit solchen Fragen, aber viele legen Wert auf die Feststellung, daß die Physik das auch könne und tue (19%). Eine Zustimmung zu 'Ralfs' Standpunkt wird häufig dadurch eingeschränkt, daß die Physik nicht allein "globale" Beschreibungen anstrebe.

"Ich stimme persönlich hier mit der Meinung Ralfs überein, obwohl sie meiner Ansicht nach nicht vollständig korrekt ist. Das Beispiel mit der Rollbahn eines Balles über Kopfsteinpflaster interessiert, meine ich, die Physik genauso sehr wie die Berechnung physikalischer Gesetze oder wie z.B. im obigen Beispiel die Flugbahn einer Rakete zum Mond." (Schülerin, GK)

Für eine Untermauerung des postulierten Denkrahmens D2 reicht die Zahl der Schüler nicht aus, die von sich aus Einzelfallstudien zum Charakteristikum der Physik erklären. Ebenso selten sind jedoch Stellungnahmen, in denen die Suche nach übergreifenden Theorien als das Kennzeichen der Physik herausgestellt wird (5%).

Einen Beleg für die Verbreitung der Vorverständniselemente A11 und D2 zumindest in Teilgruppen sehen wir darin, daß 20% der Grundkursschüler (sogar 27% der Mädchen) eine stärkere Orientierung des Physikunterrichts an Alltagsphänomenen, bzw. einen größeren Bezug zur Natur fordern. Dies wird teilweise verbunden mit einer Kritik an zu hohen Theorieanteilen des vorliegenden Unterrichts.

"Ich finde Physik von der Grundidee gar nicht schlecht. Doch wird meiner Meinung nach der Physikunterricht zu theoretisch durchgeführt. Außerdem werden zuwenig Themen behandelt, die einem im Alltag begegnen. Aber ich hoffe, daß es jetzt in der Oberstufe etwas anders wird." (Schülerin, GK)

Leistungskursschüler äußern den Wunsch nach verstärktem Alltagsbezug deutlich seltener (5%). Die Schwerpunktbildung bei den Mädchen stimmt mit den Ergebnissen des differentiellen Interessentests ITM überein (vgl. Seite 237).

Zusammenfassung

Allgemeines Interesse 1: Interesse an Phänomenen an sich

Denkrahmen 2: Aufgabe der Physik

- A11: Schüler interessieren sich für Phänomene an sich. Sie widmen sich eher genauen Untersuchungen mit spezifischen Aussagen über Einzelphänomene als Überlegungen im Hinblick auf die Bildung allgemeiner Begriffe/Prinzipien/Theorien.
- D2 "Physik hat die Aufgabe, Realitätserfahrungen genau und am Einzelfall zu erklären."

Merkmale und Aktivierungsformen:

- In SVUs Durchführung von Detailstudien an Einzelphänomenen ohne die Intention der Erarbeitung allgemeiner Begriffe oder Gesetzmäßigkeiten.
- Weitgehende Gleichsetzung von Physik und Technik.
- Genaues Hinsehen auf Feinheiten experimenteller Anordnungen oder demonstrierter Effekte statt Konzentration auf den "Kern der Sache".
- Forderung nach Orientierung der Unterrichtsinhalte an konkreten Phänomenen aus der natürlichen und speziell der technischen Umwelt.

Bedeutung und Folgerungen

Die Vorverständniselemente liegen quer zur Ausrichtung des Physikunterrichts der Sekundarstufe II auf die Vermittlung von Theorien (mit Elementarobjekten, Begriffen, Gesetzen und paradigmatischen Beispielen) und physikalischen Denkstrukturen (z.B. Wechselwirkung, Erhaltungssätze). Die Enttäuschung von gegenläufigen Erwartungen kann zur Abwendung von der Physik führen, besonders bei Schülern, für die Physik kein Eigengewicht im Hinblick auf ein angestrebtes Berufsfeld hat. Der Lehrer sollte die spezifischen Erkenntnisziele der Physik offenlegen, um Vorstellungen über Gegenstände und Aufgaben der Wissenschaft einer bewußten Reflexion zugänglich zu machen. Die Dispositionen A11 und D2 sind in Grundkursen (und bei Mädchen) häufiger anzutreffen als in Leistungskursen. In Grundkursen käme man den Interessen vieler Schüler näher, wenn zugunsten eines stärkeren Bezugs der Unterrichtsinhalte zu persönlichen Erfahrungen bei Strukturorientierung und Wissenschaftspropädeutik gewisse Abstriche vorgenommen würden.

B.3.2.1.3 Denkrahen 3: Physik beschreibt ideale Laborwelten

D3: "Physikalische Erkenntnisse beziehen sich auf ideale Gedanken- und Laborwelten. Im Alltag kann man damit wenig anfangen."

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Schüler beschränken die Gültigkeit und Anwendbarkeit physikalischer Aussagen teilweise auf Situationen, die nur unter Laborbedingungen hergestellt werden können, oder auf Gedankenexperimente ohne faktische Bedeutung für normale Verhältnisse. Denkrahen D3 steht im Gegensatz zu D2: "Physik hat die Aufgabe, Realitätserfahrungen genau und am Einzelfall zu erklären". Die gemeinsame Aufnahme der Elemente in das thematische Vorverständnis liegt darin begründet, daß sie Bestandteile unterschiedlicher individueller Vorverständnisse sein oder in individuellen Vorverständnissen nebeneinander als Dispositionen mit unterschiedlichen Aktivierungskontexten und -wahrscheinlichkeiten vorliegen können.

Der Denkrahen kann durch einen Physikunterricht verursacht werden, dem es nicht gelingt, die Bezüge der an Laborexperimenten entwickelten Strukturen zu "Realphänomenen" zu vermitteln. Er braucht keine Kritik an der Physik oder am Physikunterricht zu beinhalten. Das Fach kann aus sich heraus eine Faszination entwickeln, hinter der ein Bezug zur Alltagswelt zurücktritt. Mehrere Schüler äußerten sich dahingehend in Abschnitt C der Befragung VWP.

"Ich habe dieses Fach aus Interesse gewählt und nicht, um meine Erkenntnisse in diesem Fach zu verwerten. Ich muß ja nicht unbedingt alles, was ich lerne, auf die Realität beziehen und gleich umsetzen. Genauso ist es bei mir in der Mathematik und Chemie." (Schüler, GK)

Eine andere Erklärung für Denkrahen D3, die eine Synthese mit D2 ermöglichen würde, läge darin, daß die Schüler an die Fähigkeit der Wissenschaft Physik glauben, alle Phänomene im Detail zu erklären, die Schulphysik dagegen als stark vereinfacht ansehen, so daß nur bestimmte, im Labor konstruierte Spezialfälle erfaßt werden.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

"Alltagspraktische Bedeutung physikalischer Erkenntnisse ist gering"

Ein erstes Schlaglicht auf die Einschätzung der Relevanz praktischer Anwendungsbeispiele im Physikunterricht wirft ein kurzer Ausschnitt aus einer Unterrichtsstunde zur vektoriellen Überlagerung von Geschwindigkeiten. Als konkretes

Beispiel wurde eine Flußüberquerung durchgesprochen.

Lehrer Es dauert also immer etwas länger, wenn man gegen den Strom anschwimmen will. Was ist also sinnvoll, wenn einem im Fluß die Kräfte verlassen?

Markus (als Scherz) Strömungsgeschwindigkeit messen.

Schüler (großes Gelächter) ... genau! ... und dann mit dem Taschenrechner ...

Lehrer Und dann hast du mal wieder die falsche Formel im Kopf. Markus hätte dann gerechnet s mal v und wäre abgesoffen.

Sicherlich hat die Witzelei hier einen großen Eigenwert und man darf die Situation nicht überinterpretieren. Mehr implizit wird von Schülern (und vom Lehrer) zum Ausdruck gebracht: "Man kann solche Beispiele zwar heranziehen. In der konkreten Situation nützt einem die Physik aber doch nichts."

*

Eine der Aussagen, die in der Kinematik am stärksten herausgestellt werden, lautet: "Im Vakuum fallen alle Körper gleich schnell." Ihr analytischer Wert für tatsächliche Fallbewegungen (die Unterschiede in den Fallgeschwindigkeiten liegen nicht im Gewicht der Körper begründet, sondern im Medium) dringt jedoch zu wenig durch. Der Satz wird häufig allein auf Vakuum-Bedingungen bezogen. Dazu das folgende Beispiel aus einer Unterrichtsstunde über Kraft/Energie beim Stoß (Einführungskurs Physik, 11. Klasse):

Helga Wenn man irgend etwas, wie einen Hammer und eine Feder, fallen läßt, dann ist der Hammer zuerst am Boden. Das heißt, die größere Gewichtskraft - der wird stärker von der Gewichtskraft angezogen.

Dieter Es wurde ja auch mehr Energie aufgewendet, um den Hammer hochzuheben. Also ist auch die Beschleunigung größer und auch die Energie, die er abgibt beim Fallen.

Malte Das stimmt nicht, denn im luftleeren Raum fallen alle Körper gleich schnell.

Martin Aber das hat nichts zu sagen, denn auf der Erde ist eben kein luftleerer Raum. Auf dem Mond da wäre es so, aber hier -

In dieser Passage finden sich Beleg und Gegenbeleg zum postulierten (Miß-) Verständnis des freien Falls im Vakuum. Malte führt ihn zur Widerlegung der Abhängigkeit der Fallbeschleunigung vom Gewicht ins Feld. Martins Antwort ist symptomatisch für eine verbreitete Form des Umgangs mit idealen Gestalten: Sie werden als eigendeutsche 'Fälle an sich' betrachtet. Für den Physiker sind sie analytische Instrumente für die Strukturierung der Anfaß- und Vorzeigerealität. Das muß im Unterricht herausgearbeitet werden. "Alle Körper fallen gleich schnell" ist kein Gesetz für Fallbewegungen auf dem Mond oder für Vakuumkammern.

Gültigkeit physikalischer Gesetze für "Normalbedingungen"

In einer Stunde aus einer Unterrichtseinheit Arbeit/Energie (Leistungskurs, 11. Klasse) stoßen wir auf eine interessante Situation, in der es um die Gültigkeit physikalischer Gesetze in natürlichen, "ungereinigten" Umwelten geht.

Lehrer Wir haben jetzt die Beschleunigungsarbeit gehabt. Was für andere Arbeitsformen müßte es dementsprechend geben?

Sven Zwangsarbeit.

Schüler (lachen)

Lehrer Lohnarbeit, Akkordarbeit, entfremdete Arbeit -

Lorenz Und was ist arbeitslos?

Lehrer Ja, das ist in der Physik nicht vorgesehen. Da seht ihr mal wieder, daß Physik nichts mit der Wirklichkeit zu tun hat.

Lorenz Ja ja, ich sage das immer: Jetzt mach ich schon so lange Physik und weiß immer noch nicht, warum die Äpfelpreise im Winter steigen.

Ludwig Arbeitslos ist eine Konstante.

Lehrer Die ist nämlich null.

Auch solche Flachserie spiegelt wider, wie der Nutzen der Physik im Alltag eingeschätzt wird.

Ludwig Ich würde sagen, gleichförmige Bewegungsarbeit, die müßte es auch noch geben. Also von der gleichförmigen Bewegung, nicht beschleunigt.

Lehrer Stecke ich da Arbeit rein?

Ludwig Ja, die Reibung.

Michael Aber ideal gibt es die ja nicht.

Detlev Wir haben die immer ausgeklammert.

Lehrer Ja, wenn man die aufhebt, dann gibt es die nicht. In der Realität, wenn ein Auto mit 120 über die Autobahn fährt, dann wird da Arbeit reingesteckt.

Schüler (reden lebhaft durcheinander)

Der Unterricht ist hier an einem kritischen, aber auch potentiell fruchtbaren Moment angelangt. Es besteht ein Anlaß, über die Gültigkeit physikalischer Aussagen zu sprechen. Der Einwand, daß von der Reibung immer abgesehen werde, kommt von Schülern. Er beruht auf Unterrichtserfahrungen.

Lehrer Ja, das ist ein Wesen der Physik, daß sie von solchen Sachen -

Ludwig Das ist ja immer das Problem.

Lehrer - daß sie von solchen Sachen, die die Sache ziemlich schwierig machen, möglichst absieht. Weil nämlich die Gesetzmäßigkeiten unheimlich kompliziert würden und daran ist man nicht interessiert.

Detlev Dann stellt sich doch heraus, daß die Gleichungen eigentlich falsch sind.

Ludwig Genau!

Das Problem ist damit auf den Punkt gebracht:

- Sind die Gesetze falsch, weil an der Realität vorbei konstruiert?
- Sind die Gesetze richtig, gelten aber nur für Laborbedingungen?
- Wird der Realitätsbezug zugunsten der Einfachheit eingeschränkt?

Die Auflösung des Fragenkomplexes kann auf verschiedene Weise erfolgen. Man kann Physik als ein interessantes "Glasperlenspiel" mit Laborexperimenten und Deduktionen auffassen und dabei den Bezug zur "Natur" hintanstellen. Man kann sich von der Physik mit der Meinung abwenden, ihre Erkenntnisse seien ohne lebenspraktische Relevanz. Beide Einstellungen sind unter Denkrahmen D3 subsumierbar. Bei Schülern, die auf der Sekundarstufe II Physik als Fach gewählt haben, ist die erste häufig anzutreffen.

Eine dem spezifischen Charakter des physikalischen Zugriffs auf Natur angemessene Auflösung besteht in der Vermittlung/Gewinnung der Einsicht, daß Physik in den idealen Gestalten die einfachen Grundmuster erarbeitet, nach denen die komplexe Vielfalt natürlicher und technischer Vorgänge analysiert werden kann. Es gibt andere Naturzugänge, etwa das kontemplative Miterleben natürlicher Abläufe, wie es exemplarisch bei Thoreau (1854) zu finden ist.

Die Gestaltung des Unterrichts hat entscheidenden Einfluß auf die Weise, wie Schüler sich orientieren. Eine wissenschaftstheoretische Metadiskussion mit Schülern kann verdeckte Denkrahmen zum Vorschein bringen und einer Reflexion zuführen. Es ist aber wichtiger, daß Schüler das oben beschriebene Prinzip-Verstehen realer Vorgänge auf der Grundlage idealer Gestalten im Unterricht erfahren können. Der Unterricht muß Material bereitstellen, auf dem individuelle Anstrengungen von Schülern zur Herstellung von Bezügen aufbauen können. Auch die unterschiedlichen physikalischen Kompetenzen bestimmen den Orientierungsprozeß mit.

Ein Argument, das häufig zur Rechtfertigung vereinfachender Annahmen von Lehrern vorgebracht und von Schülern übernommen wird, lautet: Wenn wir das alles (speziell Reibungskräfte) mitberücksichtigen wollen, werden die Gesetze zu kompliziert (vgl. Punkt D.3.6.1). So auch in unserem Beispiel:

Lehrer Ja, wenn du die Reibung da reinnimmst klar. Wenn du die Reibung einbezieht, dann ist das Problem, daß die geschwindigkeitsabhängig ist. Luftwiderstand ist geschwindigkeitsabhängig. Und das heißt, daß die Kraft anwächst, die zur Beschleunigung aufgewendet werden muß. Solche Gleichungen sind relativ schwierig zu lösen. Das sind Differen-

tialgleichungen. Deswegen wird von denen gerne Abstand genommen.

Ludwig Ja, gut.

Damit ist das Gespräch beendet. Aus dieser auf typische Weise verkürzten Begründung idealer Gestalten geht deren erkenntnisleitende Funktion nicht hervor. Sie fördert eher den Eindruck, die "richtige Physik" sei ganz anders als die Schulphysik (was sie bezüglich der theoretischen Naturentwürfe nicht ist).

*

"Physik bezieht sich auf Laborwelten"

In einem Unterrichtsgespräch über Fallexperimente, die mit Gegenständen verschiedener Form und Dichte vorher durchgeführt worden waren, meldete sich nach einiger Zeit ein Schüler zu Wort, der sich bis dahin nicht beteiligt hatte:

Jürgen Ich wollte was anderes sagen zu dem Versuch. Wir wollten ja die Fallbewegung untersuchen. Und der freie Fall ist ja normalerweise im Vakuum. Wir haben bei den Papierkegeln immer eine ganze Menge Luft, die da einwirkt.

Lehrer Hm, ja. Aber ist das normal, daß man im Vakuum mißt?

Jürgen Ja, aber die Fallbewegung wird doch immer im Vakuum bestätigt.

Obwohl auf der Erde nirgends Körper im luftleeren Raum fallen (außer in Physiklaboren und Fachräumen) hält Jürgen es für normal, daß man Fallbewegungen im Vakuum untersucht. Er wundert sich offenbar darüber, daß im Kurs so lange über Fallexperimente in Luft gesprochen wird. Darauf führen wir zurück, daß Jürgen sich bis dahin nicht am Unterrichtsgespräch beteiligte und sich dann meldet, um "was anderes zu dem Versuch zu sagen".

*

Physikalische Begriffe und Alltagsbegriffe

Die Unterschiede zwischen physikalischen und Alltagsbegriffen werden im Unterricht bevorzugt an der 'Arbeit' thematisiert.

Lehrer Wie ist das jetzt z.B. mit der Hubarbeit? Ich trage einen Koffer - ziemlich schwer, so 10kg - von hier zum Bahnhof. Wieviel Arbeit muß ich aufwenden?

Jörn Wenn wir Reibung und alles vernachlässigen, eigentlich nur kurz Beschleunigungsarbeit bis auf die Geschwindigkeit.

Lehrer Und wie ist das - ich habe da die ganze Zeit dieses schwere Ding in der Hand und nachher kriege ich ganz lange Arme. Und das soll keine Arbeit sein?

Lorenz Nein, wieso, das ist doch keine Arbeit. Wenn ich den Koffer anhebe, sagen wir 30cm, dann wären das 10kg mal 9,81 mal 30cm. Dann habe ich die Hubarbeit. Das ist an und für sich alles.

Jörn und Lorenz betrachten das Koffertragen im Kontext des erlernten physikalischen Begriffs der mechanischen Arbeit als Skalarprodukt von Kraft und Weg. Der Lehrer versucht diese Sichtweise zu problematisieren. Das beliebte Beispiel des Koffertragens wird dabei oft überstrapaziert. Eine genauere Analyse zeigt, daß beim Koffertragen Arbeit verrichtet wird. Beim Gehen wird der Schwerpunkt des Systems 'Koffer + Träger' periodisch angehoben und die Beine werden beschleunigt. Die dafür notwendige Energie wird beim Absenken des Schwerpunkts thermisch abgeleitet (unelastischer Stoß der Beine mit dem Boden) und fließt nicht als nutzbare Energie zurück. Aber auch ohne solch subtile Betrachtungen wird die Aussage fragwürdig, daß beim Koffertragen keine Arbeit verrichtet werde. Das Beispiel ist zur Abgrenzung des physikalischen vom lebensweltlichen Arbeitsbegriff deshalb ungeeignet, weil die jeweils betrachteten Systeme nicht übereinstimmen. Man muß die Systemgrenzen klar angeben: Am Koffer wird physikalisch keine Arbeit verrichtet. Für Aussagen über die Energieumwandlungsprozesse beim Träger reicht der mechanische Arbeitsbegriff nicht aus. Wenn wir lebensweltlich über Arbeit beim Koffertragen sprechen, bezieht sich die Aussagen eindeutig auf den Träger. Es wird nicht behauptet, am Zustand des Koffers ändere sich etwas. Das lebensweltlich relevante System ist der menschliche Körper und hier findet auch unter physikalischen Aspekten ein Energieumsatz statt, der durch Nahrungsaufnahme auszugleichen ist.

In verkürzten Aussagen, wie "Koffertragen ist keine Arbeit", wird der grundlegende Unterschied zwischen der existenzsichernden Arbeit eines Gepäckträgers und der mechanischen Arbeit als formaler Rechengröße nicht deutlich. Es wird der Eindruck erweckt, als spräche man über die gleiche Sache einmal aus physikalischer und einmal aus alltagspraktischer Sicht.

Lehrer Nach dieser Definition von Arbeit ist Koffertragen keine Arbeit. Nur die Kraft längs des Weges macht einen Beitrag zur Arbeit. Das ist abstrus, aber es ist physikalisch so, daß es keine Arbeit ist, wenn ich einen Koffer zum Bahnhof trage.

S 1 Aber das muß doch Arbeit sein, wenn ich den ganzen Tag den Koffer rumtrage, weil da die Kraft nach unten wirkt.

Lehrer Ja, und wie ist der Weg?

S 1 Ja, die Kraft mal h.

Detlev Oder die Zeit. Wie lange man - oder die Geschwindigkeit -

Lehrer Ja, aber nach dieser Definition, die anscheinend sinnvoll ist, ist die Arbeit 0. - Was für Schlußfolgerungen kann man daraus zum physikalischen Arbeitsbegriff ziehen? Markus?

Markus Daß es keine Arbeit ist.

Lehrer So rum würde ich das nicht sehen. - Andersrum eher, daß es Arbeiten gibt, die in der Umwelt Arbeiten sind - und das ist ja anstrengend, einen Koffer zum Bahnhof zu tragen - aber physikalisch eben keine Arbeit.

Schüler (reden lebhaft durcheinander) ... das heißt Gepäckträger kriegen ihr Geld ohne Arbeit zu verrichten ...

Alex Wenn ich jetzt laufe, verrichte ich also auch keine Arbeit, wenn ich also ganz normal gehe?

Lehrer Nur Reibungs- und Beschleunigungsarbeit.

Schüler (lebhaft ducheinander) ... von mir kriegen die (Gepäckträger) kein Geld mehr ...

Hier werden Gegensätze zwischen physikalischem und Alltagsdenken an der falschen Stelle aufgebaut. Sie bieten keinen Anlaß, sich im Bewußtsein der Unterschiede in den Intentionen und Methoden um die Erfassung lebensweltlich bekannter Vorgänge aus physikalischer Perspektive zu bemühen, sondern sie fördern eine Abschottung der Bereiche gegeneinander, wie es in Denkraumen D3 zum Ausdruck kommt.

*

Ohne Zweifel bestehen qualitative Unterschiede zwischen den beiden Zugriffsweisen auf Wirklichkeit, die sich auch in den Begriffssystemen niederschlagen. Anlässe für die Thematisierung der Unterschiede zwischen lebensweltlichen Anschauungsgrößen und physikalischen Ersatzgrößen, die sich im Unterricht ergeben, sollten genutzt werden, um das Verständnis der physikalischen Begriffe zu unterstützen. Im nächsten Beispiel geht es um den Geschwindigkeitsbegriff.

An einem Diagramm mit Werten von Weg-Zeit-Messungen der Bewegung von Fahrrädern wurde in einem Leistungskurs darüber diskutiert, ob es einen Sinn mache, die Achsen des Koordinatenkreuzes ins Negative zu verlängern. Die unter den Schülern vorherrschende Meinung lautete, das sei unsinnig, weil es keine negativen Zeiten und negativen Geschwindigkeiten gebe.

Iris Ich meine auch, daß der negative Bereich absolut schwachsinnig ist. Die Zeit läuft immer weiter, die kann man nicht zurückstellen oder aufhalten. Auch die Meter - was wollen wir da im negativen Bereich? Es gibt höchstens Spezialgebiete, z.B. wenn man Christus Geburt nimmt. Alles was danach ist, ist positiv und davor negativ. Sonst kann man das nicht gebrauchen, jedenfalls in der Physik nicht.

Peter Also, Zweck des Graphen und der ganzen Versuchsreihe soll doch eigentlich eine Geschwindigkeitsberechnung sein. Doch wenn ich herausbekomme, daß er gerade mit minus 9 Meter pro Sekunde fährt, dann ist das doch total schwachsinnig.

Nur wenige Schüler, wie Kai, haben keine Schwierigkeiten mit negativen Werten.

Kai Also hier ist der Nullpunkt, von dem aus ich gemessen habe. 2 Sekunden vorher, bevor er hier angekommen ist, da beschleunigt er und fährt auf Null zu. Kurz vor Null hatte er schon die konstante Geschwindigkeit. Der Minusbereich ist dann schon wichtig, denn er ist ja vor dem Nullpunkt schon losgefahren.

Schüler Das interessiert uns ja gar nicht. Das haben wir nie gemessen.

Kai Ja, das haben wir nicht gemessen, aber deswegen kann man es ja ruhig einzeichnen. Vom Versuch her ist es ja auch wichtig, weil wir es ja auch gemacht haben.

Lehrer Da hast du zweifelsohne recht.

Nach einer gewissen Zeit räumen einige Schüler der Ablehnungsfront ein, man könne "theoretisch" vielleicht auch mit negativen Werten arbeiten, in der Praxis mache das jedoch keinen Sinn.

Kai Ich wollte sagen, daß ich es ganz interessant finde, ob es eine Minuszeit gibt oder nicht. Darum geht es ja, ob das überhaupt jemand weiß.

Lehrer Ich hoffe, daß das jemand weiß, jedenfalls habt ihr euch darüber erbittert gestritten.

Frank Hier hilft vielleicht nicht die Frage, ob es geht, sondern, ob es sinnvoll ist.

Lehrer Weiß ich nicht, ob das alle so fragen würden. Es gibt doch einige, so meine ich jedenfalls gehört zu haben, die sagen, es geht nicht, es ist Unsinn.

Ralf Rechnerisch und theoretisch klappt das sicherlich, aber in der Praxis - ob es da auch noch geht? In der Physik kommt es ja auch auf die Mathematik an. Vielleicht ist es möglich, mit negativen Zahlen zu rechnen, so daß etwas Richtiges rauskommt.

Schüler Theoretisch ist das egal, ob man auch negative Zahlen einbezieht. Aber für die Vorstellung ist das unsinnig.

Die Schüler haben die Unterschiede physikalischer Ersatzgrößen und lebensweltlicher Anschauungsgrößen in der Diskussion implizit herausgearbeitet. Die Frage, ob negative Geschwindigkeiten physikalisch, nicht nur mathematisch, einen Sinn machen, ist jedoch noch nicht geklärt. Der Lehrer hätte den fruchtbaren Moment für eine Metadiskussion nutzen können. Wissenschaftstheoretische Anmerkungen wirken an solchen Stellen nicht aufgesetzt und tragen zur Klärung des Sachverhalts bei.

Der Übergang von den Anschauungsgrößen, die für den Schüler sinnhaft erlebbar sind, zu den Rechengrößen, die nur denkbar sind, vollzieht sich offenbar im Physikunterricht zu abrupt. Der Verständnissfaden reißt ab, und nachher weiß der Schüler nicht mehr, wovon der Lehrer eigentlich redet. Er hat dann Formeln für Arbeit, Fläche, Energie, Druck, wie Vokabeln, kann damit rechnen - vorwärts und rückwärts -, weiß aber eigentlich nicht mehr, was er tut und was die Vokabeln bedeuten. Physik wird zur syntaktischen Spielerei mit Rechenkalkülen in einer

vorgestellten, aber nicht mehr erlebbaren Welt.
(Schaefer 1980, 9)

Das Zitat von Schaefer stellt eine gute Umschreibung des Gehalts von Denkra-
men D3 dar.

*

Ergebnisse einer Befragung

Die bisher für D3 herangezogenen Belege basieren auf der Interpretation von Wortprotokollen. Im Test VWP wurde Schülern eine Aussage (A4) über Physik zur Bewertung vorgelegt, die dem Denkraum D3 entspricht:

Die Physik beschäftigt sich mit einer eigenen, idealisierten Laborwelt, die sich von der Alltagswelt prinzipiell unterscheidet.

Die Aussage wurde eindeutig als unzutreffend bezeichnet.

A4: + 10% - 79% ? 12% (N = 449) + : Zustimmung zur Aussage
- : Ablehnung der Aussage
? : keine Entscheidung

In der Ablehnung der Aussage kommt eine Überzeugung vom Bezug der Physik zu Realitätserfahrungen zum Ausdruck (vgl. die Vorverständniselemente A11/D2). Eine Zustimmung zu A4 schiene zudem die Bedeutung des Fachs herabzusetzen, zu dem sich die Schüler per Kurswahl bekannt haben. Doch die Klarheit der Ablehnung überrascht. Die Befragung VWP erfaßte elfte und zwölfte Klassen zu Beginn des Schuljahres 1982/83. Man könnte vermuten, daß sich das Bild von der Physik durch die Erfahrungen in der Sekundarstufe II verschiebt. Nach Klassenstufen differenziert zeigt sich:

11. Kl.: + 9% - 80% ? 11% (N = 349)

12. Kl.: + 11% - 74% ? 15% (N = 100)

Die Verschiebung hat zwar die erwartete Tendenz, sie ist aber nur geringfügig.

An dieser Stelle kommt der Konstrukt-Charakter des Vorverständnisses zum Tragen. Für die Aufnahme eines Elements in das thematische Vorverständnis ist dessen explizite Anerkennung durch die Schüler keine unabdingbare Voraussetzung. Die Interpretation tatsächlichen Verhaltens kann zu Elementen führen, die durch direkte Befragungen nicht zu erarbeiten sind, weil sie unbewußt oder unterbewußt fungieren. In Unterrichtsprotokollen handeln Schüler in konkreten Situationen an bestimmten Gegenständen. In Fragebogenerhebungen des Typs SVM oder VWP werden dagegen pauschale Einschätzungen "der" Physik verlangt.

Die Ergebnisse werden nicht immer deckungsgleich sein.

Das Ergebnis der direkten Konfrontation der Schüler mit dem Denkraum D3 ist ein Gegenbeleg zum postulierten Vorverständniselement. Wir halten aufgrund der Belege aus Wortprotokollen an der Aufnahme von D3 in das thematische Vorverständnis fest, da es sich bei der Interpretation von Schülerverhalten in konkreten Unterrichtssituationen bewährt hat. Es wäre überzogen, aus den eben geschilderten Ergebnissen auf Verbreitungs oder Aktivierungswahrscheinlichkeiten schließen zu wollen.

Zusammenfassung

Denkrahmen 3: Physik beschreibt ideale Laborwelten

D3: "Physikalische Erkenntnisse beziehen sich auf ideale Gedanken- und Laborwelten. Im Alltag kann man damit wenig anfangen."

Merkmale und Aktivierungsformen

- Unterrichtlich behandelten Sachverhalten wird nur geringe praktische Relevanz zugemessen.
- Es wird das Bestehen von Gesetzen für Laborbedingungen und solchen für Normalbedingungen angenommen.
- Ideale Gestalten werden auf sich selbst bezogen und zu einer speziellen Realität erhoben.
- D3 geht nicht unbedingt mit einer Kritik an der Physik oder am Unterricht einher ("Interesse am Fach an sich").

Bedeutung und Folgerungen

Die Denkrahmen D3 und D2 ("Physik hat die Aufgabe, Realitätserfahrungen genau und am Einzelfall zu erklären") stehen im Gegensatz zueinander. Man kann D2 als Anspruch an die Physik interpretieren und D3 als Reaktion auf Erfahrungen im Unterricht.

Die Unterschiede zwischen lebensweltlichen Anschauungsgrößen (z.B. Arbeit, Geschwindigkeit) und physikalischen Ersatz- oder Rechengrößen werden von Schülern häufig nicht wahrgenommen. Auf diese Gesichtspunkte sollte im Unterricht stärker aufmerksam gemacht werden. In der Sekundarstufe II kann eine Meta-diskussion dazu beitragen. Damit es nicht zu einer Abschottung der Bereiche gegeneinander kommt, müssen Schüler Erfahrungen mit sinnvollen Beschreibungen von Realitätserfahrungen auf der Grundlage physikalischer Begriffe und Gesetze machen können. Der Aufbau mißverständlicher Gegensätze ("Koffertragen ist keine Arbeit") ist der Initiierung von Bemühungen um den Aufbau von Beziehungen zwischen Physik und Alltag abträglich.

B.3.2.1.4 Denkraumen 4: Physik liefert eindeutige Ergebnisse

D4: "Physik ist ein Kanon unumstößlicher Gesetze. Die Erkenntnisse werden aus genauen Experimenten abgeleitet."

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Die Erkenntnisprodukte der Physik sind nach Meinung vieler Schüler in dem Sinne eindeutig, daß sie sich auf direktem Wege aus genauen experimentellen Untersuchungen ableiten lassen und eine vom forschenden Subjekt unabhängige Form haben. Der Denkraum ist komplementär zum allgemeinen Interesse an den Erkenntnisprodukten, weniger an ihrem Zustandekommen (A1, Punkt B.3.2.3.1): Warum soll man lange über mögliche Lösungen eines Problems selber nachdenken, wenn die richtige Lösung durch die Physik bereits gefunden ist (und der Lehrer sie kennt)? Der Eindruck, daß physikalische Ergebnisse sich streng logisch aus Experimenten ergeben, wird im Unterricht durch den verbreiteten Viererschritt Experiment - Tabelle/Diagramm - 'einzig mögliche' Interpretation - Merksatz/Gesetz gefördert. Die Motive für die Wahl eines Untersuchungsgegenstands, die Zweckbestimmtheit der experimentellen Anordnung, die Auswahl der zu messenden Größen, die Interpretationshintergründe usw. werden meist unterschlagen (vgl. Niedderer 1982, 107). Jung (1970, 22) spricht von der "Unsitte", Gesetze auf direktem Wege aus Experimenten abzuleiten.

Die Problematisierung des Denkraumens D4 soll nicht etwa die intersubjektive Gültigkeit und die Geltung physikalischer Erkenntnisse in Zweifel ziehen. Wir halten es allerdings für sinnvoll, die Vorstellung von einem einfachen und naturgegebenen Weg zu richtigen Gesetzen und Theorien zu erschüttern. Zu einem realistischen Bild von Physik gehört die Einsicht in das Prozeßhafte ihrer Erkenntnisgewinnung. Physik ist kein statisches Gebäude abgeschlossener und für alle Zeiten gültiger Theorien. Ihre Ergebnisse können nicht in der Natur "aufgefunden" werden, sondern sie müssen im Abgleich theoretischer Entwürfe mit erfolgreichen oder fehlschlagenden Realisationen in der Forschergemeinschaft erarbeitet werden. Die eigentümliche Dichotomie der auf erfolgreichen Realisationshandlungen beruhenden Objektivität naturwissenschaftlicher Erkenntnisse und ihrer an Voraussetzungen (Vorurteile, Paradigmen, Vorverständnisse) gebundenen Gewinnung ist unter Punkt A.2 (speziell A.2.1, S. 41ff) ausgeführt.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

"Physikalische Ergebnisse sind eindeutig"

In einem SVU zeigte sich der Denkrahmen D4 daran, daß Schüler es als unnötig erachteten, daß zwei Gruppen das gleiche Thema behandeln, da bei beiden das gleiche herauskommen müsse. Der erste Wortprotokollauschnitt stammt aus der Phase der Themenvorstellung.

Rainer Wir hatten teilweise das gleiche wie die Gruppe von Thorsten. Und dann hatten wir noch vor, daß wir z.B. einen Wagen mit verschiedenen Geschwindigkeiten und verschiedenen Massen auf eine Wand prallen lassen wollten, um dann mit Federwaagen auszumessen, mit wieviel Kraft der Wagen aufprallt. Und sonst wollten wir noch zwei Kugeln zusammenstoßen lassen - das ist praktisch das gleiche, was Thorsten gesagt hat.

Lehrer Ihr könnt ja ruhig die gleichen Versuche machen. Kann ja sein, daß was verschiedenes rauskommt.

Rainer Das ist ja eigentlich nicht der Sinn. Da müßte ja eigentlich dasselbe rauskommen.

Lehrer Erstmal sehen.

In der Auswertungsphase berichtete eine andere Gruppe:

Arnim Wir hatten uns noch überlegt ... (Der Schüler schildert eine Fragestellung.) Aber da wäre war ja dasselbe rausgekommen, was 2 oder 3 andere Gruppen auch gemacht haben.

Lehrer Habt ihr das dann noch gemacht?

Arnim Nur mal so angeguckt, aber nicht reell. Das war eben sinnlos, weil das andere auch schon gemacht hatten. Wir hatten auch keine Zeit mehr.

Tatsächlich waren die Arbeitsprozesse in verschiedenen Gruppen beim gleichen Thema nach Zielen und Ergebnissen unterschiedlich.

*

Im folgenden Ausschnitt aus einem Einführungskurs der 11. Klasse sind die Reaktionen der Schüler auf die Ausführungen des Lehrers zu beachten. Im Unterricht war das Problem aufgetaucht, daß die in ein Diagramm umgesetzten Meßwerte eines Experiments nicht klar interpretiert werden konnten. Ein einfacher funktionaler Zusammenhang ließ sich nicht ablesen.

Lehrer Jetzt steht ihr vor einer Situation, vor der die Physik unheimlich häufig gestanden hat, nämlich Meßwerte zu haben und nicht zu wissen, ob das eine Gerade ist oder keine Gerade. Das ist auch heute noch so. Aber wenn ihr heute in physikalische Veröffentlichungen reinguckt, dann findet ihr folgendes: Da sind mehrere Meßwerte gefunden von irgendwelchen komplizierten Apparaturen und da sind die Leute aber

so ehrlich und malen so Fehlerbalken da rein. Die sind meistens so groß. (Der Lehrer zeichnet in das an der Tafel stehende Diagramm Fehlerbalken ein.) Und da kann man jede beliebige Kurve durchlegen.

Schüler (fragende Blicke, sind offensichtlich überrascht) ... Oh! ... komisch ... guck dir das an ...

Lehrer Sehr praktisch. Und dann kommt nämlich die Theorie und sagt, nach unserer Theorie läuft die Kurve so (L. zeichnet).

Schüler (lachen, reden durcheinander)

Die Schüler sind über die Schilderung des Lehrers zunächst erstaunt, dann verwirrt und verunsichert. Das hatten sie von der Physik offenbar nicht erwartet.

*

Wahrheit und Endgültigkeit der Gesetze

In einer Unterrichtseinheit zum Trägheitsprinzip ergab sich ein interessantes Gespräch, nachdem festgestellt worden war, daß man das erste Newtonsche Axiom experimentell nicht beweisen kann.

Lehrer Ja, was gibt es denn noch für Möglichkeiten, sowas (Trägheitssatz) als gegeben hinzunehmen?

Herbert Naturgesetze, oder was?

Lehrer Ja, aber wie kommst du auf Naturgesetze?

David Ja, die sind gegeben.

Lehrer Von wem denn?

Conrad Ja, von irgendwelchen Erfindern, die das mal rausgefunden haben, oder die das festgestellt haben, daß das Naturgesetze sind.

Lehrer Ja, wie haben die das denn gemacht?

Conrad Durch logisches Überlegen. Die können es ja nicht ausprobieren. Das steht da ja, das sagt man ja, daß man es (das 1. Axiom) nicht ausprobieren kann. Also, wie sollten die das früher ausprobiert haben können? Vielleicht als die Erde noch ein großes Vakuum war, oder so? (ironisch)

Lehrer Ja, aber was macht man? Man kann Versuche machen und gucken, ob das irgendwie hinkommt, aber das ist ja nun kein Beweis dafür. Es gibt aber noch eine andere Möglichkeit, wie auch vorgegangen wird in den Naturwissenschaften. Nämlich, daß man sagt: Das ist konsistent, das haut hin mit den ganzen anderen Überlegungen, die wir haben, das ermöglicht uns einfachere Erklärungen.

Herbert Und das wird dann einfach wieder aufgegeben, wenn es nicht mehr hinhaut? Also, daß die mal irgendwas rausgefunden haben, was zusammenpaßt mit den anderen Dingen und daß sich das dann später als falsch herausgestellt hat?

Lehrer Das kann sich irgendwann einmal als falsch herausstellen.

Herbert Das finde ich dann aber unbefriedigend, wenn man das so macht. Dann ist das doch nur eine Annahme, ob das richtig ist.

Conrad Was soll man denn sonst machen?

Herbert Beweisen.

Conrad Ja, wie denn? Beweis das doch mal!

Herbert ja, weiß ich nicht.

Conrad Du weißt ja, daß das nur eine Annahme ist.

Herbert Ja eben!

Kurt Dann weiß man nie, ob es falsch oder richtig ist.

Conrad Und vor allem, wozu braucht man denn sowas, wenn man das sowieso nie ausprobieren kann, also auch praktisch nie anwenden kann?

Kurt und Herbert haben offensichtlich geglaubt, daß über die Richtigkeit physikalischer Gesetze per Experiment eindeutig entschieden werden kann. Die Vorstellung, daß die Gültigkeit von anderen Kriterien mitbestimmt wird und Theorien sich als "falsch" erweisen können (besser: durch erfolgreichere Theorien abgelöst werden), bezeichnet Herbert als "unbefriedigend". Die Wahrheit physikalischer Sätze sollte nach Meinung der Schüler abschließend beweisbar sein. Conrad vertritt in dem Ausschnitt zunächst die im Unterricht vorher getroffene Feststellung über die empirische Unbeweisbarkeit des Trägheitssatzes; in seiner letzten Äußerung klingen auch bei ihm Zweifel am Sinn von Sätzen an, die nicht durch Experimente "bewiesen" werden können.

*

Der gleiche Problemkreis wurde in der Befragung VWP in 2 Aussagen zur Diskussion gestellt:

- A7) Die Physik zeichnet sich gegenüber anderen Wissenschaften (z.B. der Rechtswissenschaft) dadurch aus, daß man ohne lange Diskussion eindeutig entscheiden kann, ob eine Theorie richtig oder falsch ist.
- A8) Die Probleme, die manchmal im Physikunterricht auftreten (nicht-funktionierende Experimente, ungenaue Meßwerte, Vieldeutigkeit von Meßergebnissen), kommen in der Forschungsphysik viel seltener vor.

Die Ergebnisse:

A7:	+ 32%	- 51%	? 17%	(N = 449)	+ : Zustimmung zur Aussage
A8:	+ 20%	- 56%	? 25%	(N = 449)	- : Ablehnung der Aussage
					? : keine Entscheidung

Die Unterschiede zwischen Grund- und Leistungskursschülern sind gering. In Leistungskursen liegt die Ablehnung von A7 etwas höher. Eine statistisch signifikante Korrelation zwischen den Bewertungen der Aussagen besteht nicht. Die Zustimmung zu A7 ist niedriger ausgefallen als von uns erwartet. Nur jeder dritte befragte Schüler äußert sich überzeugt von der Möglichkeit einfacher

"richtig/falsch" Entscheidungen in der Physik. Die klare Mehrzahl der Schüler sieht hinsichtlich der Eindeutigkeit von Meßergebnissen keinen qualitativen Sprung zur Forschungsphysik (Item A8). Worauf die kritisch-realistische Einschätzung der Möglichkeiten der Physik zurückzuführen ist, die in der Antwortverteilung zu den Items A7 und A8 zum Ausdruck kommt, bleibt der Spekulation anheimgestellt. Erfahrungen mit dem langwierigen Weg der Entwicklung und Ablösung von Forschungsprogrammen werden die Schüler, wenn überhaupt, erst später machen (z.B. bei den Atomvorstellungen). Eine denkbare Ursache der Antworttendenz liegt in einem distanzierteren Verhältnis der Gesellschaft gegenüber Naturwissenschaft und Technik in der Folge der Umweltschutz- und Energiediskussion. Der nächste Beleg wird zeigen, daß sich die bei den Aussagen A7 und A8 anklingende kritische Distanz zur Naturwissenschaft bei der Sichtweise des Zustandekommens physikalischer Erkenntnisse nicht niederschlägt.

*

Empiristische Vorstellungen von der Erkenntnisgewinnung

In den Items A3 und A6 werden im Test VWP zwei Wege zur Gewinnung physikalischer Erkenntnisse vorgestellt. Der Gehalt von Aussage A3 deckt sich weitgehend mit Denkraumen D4.

- A3) Physikalische Erkenntnisse werden aus Experimenten gewonnen. Theorien lassen sich aus den Ergebnissen von Experimenten herausfiltern. Experimente entscheiden über den Bestand von Theorien.
- A6) Die Erkenntnisgewinnung in der Physik wird in erster Linie durch die logischen Überlegungen und die Eingebungskraft der Physiker vorangetrieben. Experimente dienen der Bestätigung von Theorien, die durch theoretische Spekulation gewonnen wurden.

A3:	+ 80%	- 10%	? 10%	(N = 449)	+ : Zustimmung zur Aussage
A6:	+ 66%	- 18%	? 16%	(N = 449)	- : Ablehnung der Aussage
					? : keine Entscheidung
	+ A3 $\wedge$ + A6 : 50%				
	+ A3 $\wedge$ - A6 : 15%				
	- A3 $\wedge$ + A6 : 8%				

Die große Zustimmung sowohl zu A3 als auch zu A6 zeigt, daß die Aussagen von den Schülern nicht als Alternativen, sondern als nebeneinander mögliche Wege der Erkenntnisgewinnung gesehen wurden. Die Beantwortungen sind statistisch unabhängig ($\lambda_{\text{sym}} = 0,03$).

Die beiden Aussagen sollten zwei gegensätzliche Positionen charakterisieren, zwischen denen eine Entscheidung getroffen werden kann. A3 kennzeichnet den

"naiven Empirismus" ("Theorien lassen sich aus den Ergebnissen von Experimenten herausfiltern."), der in der Wissenschaftstheorie keine Verfechter mehr findet. Man darf für diese Position nicht die Induktionslogik in Anspruch nehmen. Es ist zu unterscheiden zwischen Induktionsschlüssen, die sich in der menschlichen Erfahrung zwar vielfach bewähren, für die es aber keine logische Begründung gibt, und der Induktionslogik. Diese behauptet nicht, man könne Gesetzhypothesen ohne Intuition, Spekulation oder Glück auf rein "induktivem" Wege finden. Die Induktionslogik macht Aussagen über Methoden der Überprüfung und die Wahrscheinlichkeit von Sätzen nach deren Gewinnung (vgl. Carnap 1959, 9).

A6 betont die Bedeutung des kreativen Denkens und der Spekulation ("Eingebungskraft") bei der Erkenntnisgewinnung und geht somit über das hinaus, was man gemeinhin unter 'Deduktion' versteht. Experimente dienen nach A6 der Realisation von Theorien, d.h. der Schaffung einer der Theorie gemäßen Anfaß- und Vorzeigerealität. Sie haben eine gänzlich andere Funktion als in A3.

Um die Gegensätze zwischen A3 und A6 zu erkennen, müssen die Texte sorgfältig gelesen werden und die wissenschaftstheoretischen Aspekte schon einmal reflektiert worden sein. Wenn diese Bewertungsgrundlage nicht vorliegt, werden die beiden Aussagen vermutlich als 'Induktion' (A3) und 'Deduktion' (A6) interpretiert, die in den Einleitungen von Schulbüchern als typische Methoden der Physik genannt werden.

Dafür spricht das Ergebnis der Kreuztabellierung. 50% der Schüler stimmen sowohl A3 als auch A6 zu, sehen also keine Gegensätzlichkeit in den Aussagen. Nur 8% sehen A6 als richtig an und lehnen A3 ab, während 15% A3 zustimmen und A6 ablehnen. Das Bild von der Erkenntnisgewinnung ist korrekturbedürftig. Der "naiv-empiristische" Weg wird von der überwiegenden Mehrzahl der Schüler als die Methode der Physik angesehen. Die unerwartet hohe Zustimmung zu A6 bezieht sich vermutlich auf den ersten Satz der Aussage, den man auch so lesen kann, als werde von der Genialität berühmter Physiker gesprochen. Die Ergebnisse dieser Erhebung stimmen in der Tendenz mit denen früherer Arbeiten aus dem Projekt "Wissenschaftstheoretisch orientierter Physikunterricht" an der Universität Bremen überein (siehe Krüger 1982).

*

Empiristisches Denken zeigte sich in einem Leistungskurs bei der Besprechung eines Originaltextes von Galilei. In dem Auszug aus den 'Discorsi' (Galilei 1637) definiert Galilei die gleichförmig beschleunigte Bewegung. Folgender Text lag

den Schülern vor:

Wir haben uns entschlossen, diejenigen Erscheinungen zu betrachten, die bei den frei fallenden Körpern in der Natur vorkommen und lassen die Definition der beschleunigten Bewegung zusammenfallen mit dem Wesen einer natürlich beschleunigten Bewegung.

Wenn ich daher bemerke, dass ein aus der Ruhelage von bedeutender Höhe herabfallender Stein nach und nach neue Zuwüchse an Geschwindigkeit erlangt, warum soll ich nicht glauben, dass solche Zuwüchse in allereinfachster, Jedermann plausibler Weise zu Stande kommen? Wenn wir genau aufmerken, werden wir keinen Zuwachs einfacher finden als denjenigen, der in immer gleicher Weise hinzutritt.

Die gleichförmig oder einförmig beschleunigte Bewegung ist eine solche, bei welcher in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitsmomente hinzukommen.

Galilei behauptet nicht, er habe bemerkt, daß ein herabfallender Stein in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitszuwüchse erlangt. Er macht über die Verhältnisse beim freien Fall eine spekulative Annahme unter Zugrundelegung des Postulats der Einfachheit der Natur: "Warum soll ich nicht glauben, dass ...". Die Schüler interpretierten den Text überwiegend so, als habe Galilei die Definition der gleichförmig beschleunigten Bewegung der Natur "abgeguckt". Dem Lehrer gelang es nicht, den spekulativen Charakter von Galileis Vorgehensweise zu verdeutlichen. Das Vorverständniselement D4 macht die Lesart verständlich, die die Schüler an den Tag legten. Die prägnantesten Aussagen von Schülern sind im folgenden zusammengefaßt.

Tom Galilei leitet seine Gedanken mehr oder weniger aus der Praxis ab.
(...)

Lehrer Was für eine Qualität würdet ihr der Schlußweise von Galilei zubilligen, die da im zweiten Absatz kommt? - - Galilei scheut sich gar nicht davor, das entsprechende Verb zu benutzen. ("glauben")

Frank Er glaubt es von seinem Verstand her so, bzw. er sieht es so, wie es sich ihm bietet.

(...)

Kai Ich finde das gut, weil er alles zurückstellt, was er vorher wußte und ganz von vorne anfängt, und versucht, sich jeden Schritt vorzustellen, um ein Ergebnis zu bekommen. Also für die Kirche war das ja schon alles festgelegt, und davon geht er eben nicht aus, sondern fängt ganz von vorne noch einmal an. Und alles Wissen, was er vielleicht hatte, das zählt diesmal nicht. Also, er sagt nicht, das ist richtig, davon kann ich jetzt schon ausgehen. Er setzt gar nichts voraus.

Kai formuliert eindrucksvoll seine Vorstellung vom vorurteilsfreien Betrachten der Natur als angemessene Weise der Erkenntnisgewinnung. Oswald pflichtet ihm bei:

Oswald Ja, ich empfinde es auch so, wie Kai das gesagt hat. Galilei sieht das alles ziemlich einfach. Er macht das nicht wie heutzutage, wo das alles erst einmal kompliziert gesehen wird. Man geht dann daran, und

es wird viel gerechnet. Er sagt sich, das muß ganz einfach sein, das kann man sicher ganz einfach erklären.

Lehrer Ja, woraus folgert er das denn? Hat er sozusagen experimentelles Material? Hat er so etwas wie Versuche?

Frank Ja, er hat einen Stein fallengelassen und sich die Bewegung angeguckt. Und daraus hat er gefolgert -, bzw. er hat das, was er gesehen hat, versucht in Worte zu kleiden.

Die Schüler lesen den Galilei-Text vor dem Hintergrund eines empiristischen Bildes von physikalischer Erkenntnisgewinnung so, als habe Galilei die Definition der Beschleunigung mehr oder weniger direkt aus Fallexperimenten abgeleitet. Besonders deutlich ist das bei Frank. Die Prämissen, die in Galileis Argumentation eingehen (Glaube an die Einfachheit von Naturgesetzen, Idealisierung der Fallbewegung), werden von den Schülern aufgrund ihrer empiristisch geprägten individuellen Vorverständnissen nicht gesehen.

*

Schüler legen Wert auf experimentelle Genauigkeit

Eine Aktivierungsform des Denkrahmens D4 besteht in der Betonung der Genauigkeit von Experimenten. Physik als exakte Naturwissenschaft ist in der Tat angewiesen auf durchdachte Versuchsanordnungen, gewissenhafte Durchführungen und reproduzierbare Meßdaten. Schüler arbeiten in SVUs experimentell meist sehr sorgfältig. Die Defizite liegen eher beim Durchdenken des Sinns und Nutzens der eingesetzten Experimente für die Beantwortung der gewählten Fragestellung. Hier liegt die Kehrseite der Konzentration auf experimentelle Exaktheit. Die Bedeutung theoretisch-kreativer Vor- und Zwischenüberlegungen werden im Vergleich unterschätzt. Der Gesichtspunkt, daß jedes Experiment, das die Erkenntnis voranbringt, in einem theoretischen Zusammenhang steht, dringt im Unterricht offenbar zu wenig durch.

Genauigkeit kann zum Selbstzweck werden. Schüler achten bei Demonstrationen manchmal weniger auf das grundsätzliche Phänomen als auf Feinheiten der experimentellen Anordnung.

Bei Einführungen in das Thema "Bewegungen in beschleunigten Bezugssystemen" wurden in 3 Kursen Experimente mit Kugeln auf einer großen Drehscheibe durchgeführt. Daran sollten einige grundlegende Effekte bei Drehbewegungen qualitativ veranschaulicht werden. Die Drehscheibe wurde von Hand in Bewegung gesetzt. In allen drei Kursen konzentrierten die Schüler sich zunächst auf Fragen der Genauigkeit möglicher Messungen. So wurde durchgängig gefordert, die Scheibe mittels eines Motors anzutreiben, um die Drehzahl "genau" einstellen

zu können und so "genaue" Ergebnisse zu bekommen. Auf die Stärke der Krümmung von Bahnen im beschleunigten System (per Blaupapierabdruck sichtbar gemacht) oder auf den genauen Winkel im ruhenden System zwischen Radius und Ablaufrichtung einer Kugel, die relativ zur Scheibe vorher festlag (80, 90 oder 100 Grad?) gingen die Schüler in den ersten Äußerungen stärker ein als auf qualitative Beschreibungen der Bewegungsverläufe.

*

Bei der Auswahl von Fragestellungen für Themen in SVUs spielt die erzielbare Genauigkeit der Messungen eine mitentscheidende Rolle, wie die folgenden Aussagen zeigen. Als Gründe für Entscheidungen gegen bestimmte Fragestellungen wurden z.B. genannt:

"Unser erster Versuchsgedanke war, ein fahrendes Auto (gemeint ist ein Experimentierwagen) auf ein stehendes Auto aufprallen zu lassen, um so die Energieübertragung durch die Geschwindigkeiten zu messen. Diesen Versuch haben wir fallengelassen, weil wir der Meinung waren, daß die Reibung zu groß ist und sich so große Meßungenauigkeiten ergeben."

"Wir wollten einen Wagen von einer schiefen Ebene herunterrollen und gegen einen Holzklotz krachen lassen, der dadurch verschoben wird. Das haben wir aufgrund zu großer Reibung und zu großer Meßungenauigkeit verworfen."

"Wir haben nicht versucht, eigene Versuche zu überlegen. Warum soll ich mir Versuche selbst ausdenken, die dann auch noch ungenau sein können, wenn es vorgefertigte Aufbauten gibt, die das genaue Ergebnis liefern?"

Zusammenfassung

Denkrahmen 4: Physik liefert eindeutige Ergebnisse

D4: "Physik ist ein Kanon unumstößlicher Gesetze. Die Erkenntnisse werden aus genauen Experimenten abgeleitet."

Merkmale und Aktivierungsformen

- Glaube an die Eindeutigkeit physikalischer Untersuchungsergebnisse und die abschließende Beweisbarkeit von Gesetzen/Theorien.
- Empiristische Vorstellungen über die Erkenntnisgewinnung.
- Der theoretische Rahmen, in den Experimente eingebettet sind, findet weniger Beachtung als die Technik der Versuchsdurchführung.

Bedeutung und Folgerungen

Auch wenn die Schüler in einer direkten Befragung die Ergebnisse der Physik mehrheitlich nicht hinsichtlich ihrer Eindeutigkeit über solche anderer Wissenschaften stellen wollten, ist ihr Verhalten im Unterricht doch von der Annahme geprägt, daß die Physik auf relativ direktem Wege zu wahren Sätzen gelangt. Diese Vorstellung wird durch einen Unterricht gefördert, der den geradlinigen Weg vom Experiment zur Theorie vorexerziert und dabei die unschwellig eingehenden Voraussetzungen verschweigt. Es gilt, das empiristische Bild von der Physik zurechtzurücken - nicht nur, weil es der Realität des Forschungsprozesses nicht angemessen ist, sondern auch, um das Lernen physikalischer Inhalte zu fördern. Pukies hat das unter dem Stichwort "Aufhebung des Warencharakters in der Darbietung des Lehrstoffes" angesprochen.

Den Schülern wird es möglich, die Begriffe, Theorien, Prinzipien der Naturwissenschaften zu verstehen und nicht nur auswendig zu lernen. Denn diese die Wissenschaft konstituierenden grundlegenden Begriffe sind nicht Produkt empirischer Datensammlung, sondern Ergebnis philosophisch-spekulativen Denkens und damit nur verstehbar, wenn dieser Entstehungsprozeß aufgezeigt und nachvollzogen wird.
(Pukies 1979, 13)

B.3.2.2

Bereich 2: Problemlösungsverhalten/Denkstrategien

Im Bereich 2 werden Vorverständniselemente dargestellt, die Vorgehensweisen von Schülern bei der Bearbeitung physikalischer Sachverhalte beschreiben - sei es bei der Lösung von Testaufgaben, bei der Findung und Bearbeitung von Fragestellungen in SVUs oder im fragend-entwickelnden Unterrichtsgespräch. Das Hauptaugenmerk liegt auf Denkrahen, die mit Schwierigkeiten bei der Aneignung der Newtonschen Mechanik in ursächlichen Zusammenhängen stehen.

Die Erforschung des Problemlösungsverhalten, die z.B. Walter Jung mit der Methode des "lauten Denkens" anhand eines Vergleichs der Vorgehensweisen von Lernern und Experten betreibt, ist mit der Hoffnung verbunden, daß Schülern durch das Aufzeigen von Denkrahen, die den Erwerb physikalischer Kompetenz behindern, und ihrer Alternativen globale Hilfen angeboten werden können, die zu grundlegend neuen Sichtweisen von Phänomenen führen. Solche Hilfen können die Fortentwicklung individueller Vorverständnisse besonders befördern.

B.3.2.2.1 Denkrahmén 5: Eigenschaftsdenken

D5: Schüler betrachten physikalische Größen als körperbezogene Eigenschaften.

Struktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Die Anbindung physikalischer Größen an Körper ist eine sehr verbreitete Disposition. Sie ist bei einigen Größen, wie Ladung oder Masse, gerechtfertigt, bei der Mehrzahl der mechanischen Größen jedoch nicht. Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Impuls, Drehimpuls sind relationale Größen. Sie setzen die Definition von Bezugssystemen voraus. Kraft ist eine Wechselwirkungsgröße. Energie, Gesamtimpuls und Gesamtdrehimpuls sind Systemgrößen. Der Relations-, bzw. Wechselwirkungscharakter ist für die Begriffe konstitutiv, auch wenn er wegen der Verwendung bestimmter Sprachmuster nicht immer hervortritt. Wenn wir im Unterricht davon sprechen, ein Körper "habe" ein Gewicht, eine Geschwindigkeit oder eine potentielle Energie, so werden jeweils bestimmte Bezugssysteme vorausgesetzt.

Unsere Alltagssprache stellt mehr Ausdrucksmöglichkeiten für Eigenschaften zur Verfügung als für Relationen. Die Kategorien des 'Besitzens' und 'Einwirkens-auf' liegen sprachlich näher als die des 'Wechselwirkens-mit'. (Z.B. ist die Aussage "Peter ist mutig" eingängiger als "Peter reagierte in der Situation sehr mutig".) Auf die Bedeutung der Muttersprache für die kategoriale Weltansicht haben wir bereits unter Punkt A.2.1 hingewiesen. Nicht nur für das Lernen von Physik, sondern auch für das Verständnis ökologischer Zusammenhänge und die Friedenserhaltung ist eine Förderung des Wechselwirkungs- und Systemdenkens sinnvoll.

Bei vielen mechanischen Vorgängen ist die Erde der "natürliche" Wechselwirkungspartner und die Erdoberfläche, bzw. das Laborsystem das "natürliche" Bezugssystem. Da die Bezüge im Alltagsdenken nicht variiert werden, entsteht der Eindruck, Gewicht oder Geschwindigkeit seien Körpereigenschaften. Die "Schwere" wurde auch in der Physik lange als Eigenschaft kategorisiert (Aristoteles, Impetustheorie). Bei Prozessen, an denen die Erde als Wechselwirkungspartner unmittelbar beteiligt ist (z.B. Anfahren/Bremsen eines Autos, freier Fall), ist die Reaktion der Erde wegen ihrer riesigen Masse vernachlässigbar. Aufgaben, wie die Berechnung der Änderung des Erddrehimpulses beim Anfahren eines Güterzuges, haben einen Wert als Anwendungsbeispiel für die physikalische Theorie, sind aber ohne praktische Relevanz. Im Alltag kommt man weitgehend ohne Wechselwirkungsdenken aus.

Muttersprache und (fehlende) Alltagserfahrungen sind Quellen der Probleme von Schülern mit dem Wechselwirkungs- und dem relationalen Denken. Dazu kommt eine personale Betrachtungsweise mechanischer Prozesse. Neben der Erdoberfläche ist die eigene Person der natürliche Bezugspunkt für Bewegungen. Bei 'Kraft' (als Clusterbegriff) gibt es ebenfalls personale Bezüge: Um etwas in Bewegung zu setzen muß ich/man "Kraft haben". Die Betrachtungsweise wird durch Personifizierung auf andere Körper übertragen: "Je mehr Kraft das Auto hat, desto schneller ist es" (Schüleraussage). Wir können die Ursachen des Eigenschaftsdenkens hier nur anreißen. Es bleibt festzuhalten, daß Schüler eher von "Kraft haben" sprechen (die "man" dann auch ausüben kann) als von "Kräfte wirken zwischen". Viennot (1979) erklärt die Tendenz, physikalische Größen den Körpern selbst zuzuschreiben, zu einem generellen Merkmal des "spontanen Denkens".

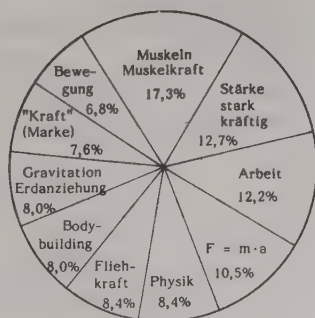
Eigenschaftsdenken beim Kraftbegriff

In der Mechanik wirkt sich die Disposition zum Eigenschaftsdenken am stärksten beim Kraftbegriff aus. Bei verschiedenen Präkonzepten im Bereich der Dynamik wird das deutlich (siehe Punkt B.3.3.2.2). Ein anderes Beispiel wären die Widerstände von Schülern gegen negative Werte bei Geschwindigkeitsangaben oder die Schwierigkeiten, Geschwindigkeiten in gleichförmig bewegten Bezugssystemen anzugeben. Zur Illustration des Eigenschaftsdenkens greifen wir an dieser Stelle die Ergebnisse des Assoziationstests ATK auf (Stichwort "Kraft"). Der Test wurde in Grund- und Leistungskursen der 11. Klasse nach der Behandlung der Newtonschen Mechanik durchgeführt.

Die 132 beteiligten Schüler nannten 135 verschiedene Begriffe in 629 Nennungen. Homologe Begriffe wurden dabei zusammengefaßt (z.B. Supermann/Herkules/Goliath). Die 10 am häufigsten assoziierten Begriffe verteilen sich prozentual folgendermaßen:

1. Muskeln/Muskelkraft	17,3%
2. Stärke/stark/kräftig	12,7%
3. Arbeit	12,2%
4. $F = m \cdot a$	10,5%
5. Physik	8,4%
Fliehkraft	8,4%
7. Bodybuilding	8,0%
Gravitation/Erdbanziehungskraft	8,0%
9. "Kraft" (Lebensmittelmarke)	7,6%
10. Bewegung/bewegen	6,8%

N = 239 Nennungen



Diese 10 Kategorien machen nur 8% der insgesamt genannten Begriffe aus, decken aber 38% aller Nennungen ab. Zählt man nur die als erstes aufgeschriebenen Assoziationen, so verschiebt sich der Schwerpunkt noch stärker zu den Kategorien Muskeln, Stärke und Bodybuilding. Kraft ist auch bei einer Befragung im Physikunterricht und nach einem Mechanikkurs assoziativ in erster Linie an die Körpereigenschaft "stark sein" gekoppelt. Durch die Auswahl der Population ist die erhaltene Assoziationsstruktur sicherlich mitgeprägt worden. Eine Befragung von Schülern in Deutschkursen hätte ein anderes Bild ergeben. Für unsere Zwecke waren die Randbedingungen bewußt so gewählt, da das Interesse den Assoziationen von Schülern im Physikunterricht galt. An der Gesamtzahl der Nennungen haben physikalische Einfälle einen Anteil von über 50%, die häufigsten und die ersten Einzelassoziationen kommen aber aus dem Bereich Körperkraft. Die physikalischen Einfälle finden sich vermehrt in der zweiten Hälfte der abgegebenen Begriffslisten. Sie stammen damit aus einer Phase, in der nach unseren Beobachtungen weniger spontan assoziiert als konzentriert nachgedacht wurde.

Die Gesamtheit der Assoziationen kann nach 5 Bereichen geordnet werden:

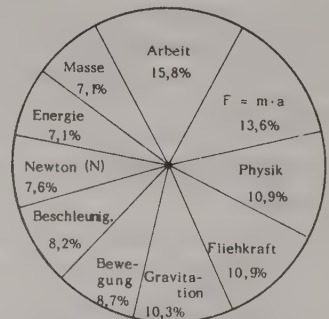
1. Physik	56,1%
2. Körperstärke	26,9%
3. Technik (Motor, Maschinen)	4,9%
4. Gesellschaft (Macht, Gewalt)	4,1%
5. sonstiges	9,0%

N = 629 Nennungen

Bei den physikalischen Assoziationen zeigt sich hinsichtlich der Verteilung der Einzelbegriffe das folgende Bild:

1. Arbeit	15,8%
2. $F = m \cdot a$	13,6%
3. Physik	10,9%
Fliehkraft/Zentrifugalkraft	10,9%
5. Erdanziehungskraft/Gravitation	10,3%
6. Bewegung/bewegen	8,7%
7. Beschleunigung/beschleunigen	8,2%
8. Newton (N)	7,6%
9. Energie	7,1%
Masse	7,1%

N = 353 Nennungen



"Arbeit" steht an erster Stelle der physikalischen (oder besser: physikalisch interpretierbaren) Assoziationen. Verbindungen können über den Merksatz "Arbeit ist Kraft mal Weg" oder lebensweltlich über "Kraftanstrengung" bei körperlicher Arbeit bestehen. "Bewegung" liegt vor "Beschleunigung". Die Verbindung von Kraft und Beschleunigung, der Kern der Newtonschen Axiome, ist auch nach den Mechanikkursen in der Sekundarstufe II zumindest assoziativ wenig ausgeprägt. Der Begriff "Wechselwirkung" wurde überhaupt nicht assoziiert. " $F = m \cdot a$ " bleibt als Formel im Gedächtnis. Auf die Frage, wieweit sie inhaltlich verarbeitet werden, wird später eingegangen.

B.3.2.2.2 Denkrahen 6: Verursacher-Fixierung/Aktivitätsdenken

D6: Schüler orientieren sich bei der Beobachtung, Beschreibung und Erklärung von Vorgängen an den vermeintlichen Verursachern. Bestimmten Systemkomponenten wird eine handelnde, agierende Rolle zugeschrieben, anderen eine reagierende, passive Rolle.

Struktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Die Einteilung in aktive und passive Systemkomponenten steht dem Wechselwirkungskonzept ebenso entgegen wie das Eigenschaftsdenken (Denkrahen 5). Unter physikalischen Aspekten ist z.B. ein Stoß die Wechselwirkung zweier gleichberechtigter Partner. Es gibt keinen eigentlich "stoßenden" oder "gestoßenen" Körper, auch wenn man wegen der unumgehbaren Verwendung alltagssprachlicher Elemente in physikalischen Diskursen diese Adjektive gebraucht. Durch einen Wechsel des Bezugssystems kann jeder der beiden Stoßpartner vor dem Stoß in Ruhe sein. Für die Vorhersage des Prozeßverlaufs ist das Bezugssystem beliebig wählbar. In Alltagssituationen (z.B. Auffahrunfall, Schubsen eines Mitschülers) kann ein Bezugssystemwechsel den Bedeutungszusammenhang auf den Kopf stellen. Hier ist die Einteilung in Verursacher und Betroffene, bzw. in aktive und passive Komponenten sinnvoll. Jung hat darauf hingewiesen, daß "Aktivität und Ursache" als aus dem Alltagsdenken entlehnte "Organisation der Erfahrung" den Erwerb des physikalischen Systems bei Kraft und Stoß beträchtlich stören (vgl. Jung 1981a, 24). Viele von Jungs Beispielen haben Parallelen zu unseren Daten.

Verursacherfixierung und Aktivitätsdenken finden ihre spezifischen Ausprägungen in dem Präkonzept, nur aktive Körper könnten Kräfte ausüben, und bei der Interpretation des dritten Newtonschen Axioms ("actio gleich reactio"). Wir gehen auf beide Punkte später ausführlich ein (siehe Punkt B.3.3.2.4), daher sind unter D6 nur zwei Belege ausgeführt.

Diskussion des Elements an Beispielen

Das Anfahren von Autos - Eine Fallstudie

Das längere Wortprotokoll wird zeigen, wie schwer es Schülern fällt, die Straße als einen Wechselwirkungspartner ins Auge zu fassen, der auf ein Auto oder einen Fußgänger eine beschleunigende Kraft ausübt. Die Schüler konzentrieren sich bei der Beschreibung des Vorgangs auf den technischen Verursacher (Motor) und den Mechanismus der "Kraftübertragung". David ordnet das diskutierte Problem gleich zu Anfang als ein technisches ein. Der Straße wird trotz

mancher Lehrerimpulse keine besondere Beachtung geschenkt. Sie kann keine Kraft ausüben, weil sie nicht aktiv ist, sondern einfach nur daliegt. Statt dessen kommen viele, teils skurrile, teils technisch-alltagspraktisch sinnvolle Einfälle. Zur Einordnung der Stunde in den Kursverlauf ist zu sagen, daß vorher die Beziehung $F = m \cdot a$ erarbeitet worden war und der Lehrer zum dritten Axiom überleiten will.

Lehrer Was heißt das eigentlich - "Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung"? Wann wirken demzufolge denn Kräfte? - - (lange Pause)

Conrad Wenn eine Masse beschleunigt wird.

Lehrer Wie passiert das denn, wenn z.B. ein Auto an der Ampel anfährt?

David Ich kenn mich in den technischen Sachen nicht so aus.

Lehrer Also, wenn so ein Auto an der Ampel anfährt, dann beschleunigt es ja. Wo wirkt da eine Kraft? - - Muß ja, wir haben gesagt F gleich m mal a .

Sven Der Motor ist da die Zugkraft. Das überträgt sich auf die Räder und von den Rädern auf die Straße.

Man beachte in der letzten Lehrerfrage die aktive Formulierung "das Auto beschleunigt". Der Alltagssprachgebrauch birgt das Aktivitätsdenken in sich. Formulierungen wie "das Auto wird beschleunigt" klingen gekünstelt.

Lehrer Was bewirkt denn nun die Kraft? Gut, der Motor muß irgendwas damit zu kriegen haben.

Sven Das geht über das Getriebe und von den Rädern auf den Boden. Ich meine, das sieht man ja nicht.

Lehrer Vielleicht ist ein anderes Beispiel einfacher zu analysieren: Ein Fußgänger - wie ist das denn da? Erst soll er stehen, dann geht er los. Da muß ja auch - er beschleunigt ja. Wo wirkt da welche Kraft? Wie bewegt man sich fort?

Bärbel Indem man fällt. Man verlagert sein Gewicht nach vorne, fällt quasi ein bißchen und dann, ja -

Lehrer Ist für die Fortbewegung denn nur man selbst nötig? Also, nur die Kraft, die man aufwendet? Oder wie ist das?

Nils Auch das Gehirn.

Lehrer Gut, das koordiniert dann die ganze Bewegung.

Conrad Die Erdanziehungskraft hat damit sicher auch etwas zu tun. Wenn man hoch springt, dann bleibt man doch nicht oben, sondern kommt wieder runter.

Lehrer - - - (lange Pause) Wenn man jetzt loslaufen will - Man übt eine Kraft aus, gut. Ist das jetzt alles? Bewegt man sich dann auf jeden Fall?

David Nein es kommt auch irgendwie darauf an, ob noch eine Kraft gegen einen wirkt. Was weiß ich, wenn man vor einer hohen Rampe steht und da nicht hoch kommt. Dann geht das nicht so einfach.

Von sich aus bringen die Schüler die Straße nicht als Systemkomponente ein.

Da nach den Kräften gefragt ist, konzentrieren sich die Schüler auf die "aktiven Verursacher". Der Lehrer versucht durch einen Hinweis auf die zu der Zeit herrschenden, winterlichen Straßenverhältnisse den Untergrund ins Blickfeld zu rücken. Die Schüler beziehen daraufhin den Boden als Voraussetzung für die Entfaltung der Motorkraft in ihre Überlegungen ein, nicht jedoch als einen selbst Kraft ausübenden Körper.

Lehrer Gut, dann muß man hoch, das geht dann schwerer. Aber auch da - kommt man da jede Rampe hoch? Denkt mal so an die letzten Tage.

David Bei Glatteis wird es schwierig.

Lehrer Beim Auto ist es doch genauso. Bei Glatteis - was passiert da, wenn ein Auto anfahren will?

Conrad Da ist keine Haftung Reifen - Straße.

Lehrer Aber der Motor ist doch derselbe. Der übt doch dieselbe Kraft aus.

Conrad Ja, der Motor erzeugt, oder sowas, dann Kraft, die dann aber nur mit Beihilfe der Räder wirkt, oder sowas.

Der Lehrer macht hier eine unzutreffende Aussage. Bei Glatteis übt das Auto natürlich nicht die gleiche Kraft aus. Die Größe der Kraft wird von Auto und Straße bestimmt. Das Beispiel zeigt, wie auch Experten bei spontanen Äußerungen in das Aktivitätsschema verfallen können.

Lehrer Aber die Räder sind doch dieselben und die Reifen auch.

Conrad Aber die haben keine Haftung. Sie können eben nicht auf den Boden wirken, daß das Auto wegfährt. Der Boden hält das halt am Boden, so daß das nicht wegliegt.

Sven Die Kraft muß doch irgendwie übertragen werden auf den Boden, damit man vorwärtskommt. Wenn man in der Luft stehen würde und sich die Räder drehen würden, dann würde man ja auch nicht von der Stelle kommen.

Nils Man muß sich irgendwie abstoßen können. Das ist, glaube ich, auch beim Gehen so. Man muß sich mit dem Fuß irgendwie abstoßen können.

Kurt Das meine ich auch, daß man einen festen - irgendwie, daß man sich abstoßen kann. Wenn man mit dem Auto fährt und es wäre kein Boden vorhanden, dann drehen die Räder durch.

Den Schülern ist klar, daß die Straße beim Anfahrvorgang eine Rolle spielt. Die Kräfte bestimmt im Aktivitätsdenken jedoch der Motor. Die Straße kann allenfalls die Wirkung der Motorkraft herabsetzen. Eine Einwirkung des Autos auf die Straße wird ebenso wenig gesehen, wie eine Einwirkung der Straße auf das Auto. Die Vorstellung, daß das Auto eine Kraft auf die Straße ausübt und nicht unter Benutzung der Straße ("zum Abstoßen") auf sich selbst, erscheint den Schülern seltsam, wie wir gleich sehen werden.

Lehrer Wenn man jetzt die Richtung der Kräfte einzeichnen will - Kraft hat ja eine Richtung, genauso wie z.B. Beschleunigung eine Richtung hat -

wie wäre das hier beim Auto, wenn das in diese Richtung fahren will?
- - - (lange Pause)

Nils Ich würde vom Motor aus einen Pfeil zu den Rädern machen. Und dann wird das irgendwie übertragen auf so ein Zahnrad - also, auf die Räder - und dann muß das in diese Richtung. (deutet Fahrtrichtung an)

Lehrer Wohin drehen sich eigentlich die Räder?

Conrad Vorwärts.

Lehrer Gut, was passiert jetzt an der Straße - damit der sich fortbewegen kann?

S 1 (mit stark ironischem Unterton) Die Straße wird nach hinten geschoben.

Schüler (lautes Lachen)

S 2 Das Auto ist gut, was?

Lehrer Die Straße und - Womit ist die Straße verbunden?

Schüler Erde

Lehrer Ja, die Erde wird ein bißchen nach hinten geschoben.

S 3 Ist ja toll. (Die Aussage klingt wie: "Du kannst uns ja viel erzählen".)

Lehrer Das mit dem Nach-Hinten-Schieben der Straße, das glaubt ihr nicht, nicht wahr?

Bärbel Nein, das ist doch unlogisch.

Rolf Wenn zwei Autos in verschiedene Richtungen fahren würden, dann würde die ja so auseinandergezogen werden.

Schüler (lachen und unterhalten sich über Rolfs Idee) ... einer nach Osten und einer nach Westen ... deswegen dreht sich die Erde ...

Der Lehrer verdeutlicht die Einwirkung des Autos auf die Straße später anhand der Querrillen im Asphalt vor Verkehrsampeln. Die Schüler erkennen, daß eine Kraft auf die Straße ausgeübt wird. Die Vorstellung, daß gleichzeitig und gleichberechtigt die Straße eine Kraft auf das Auto ausübt, findet dagegen kaum Resonanz. Sie widerspricht dem Aktivitäts- und Verursacherdenken.

*

Actio und reactio

Im zweiten Beispiel treffen wir auf ein verbreitetes (Miß-) Verständnis des dritten Newtonschen Axioms. Danach ist 'reactio' der passive Widerstand eines Körpers gegen angreifende Kräfte. Die Aussage der betragsmäßigen Gleichheit von 'actio' und 'reactio' wird auf den Zustand der Ruhe bezogen. 'Actio' und 'reactio' sind so lange gleich, wie sich am Zustand des Körpers nichts ändert. Damit sich eine Wirkung zeigt, muß 'actio' größer sein als 'reactio'.

Ein besonders prägnantes Beispiel für diese Sichtweise ergab sich in folgender Situation: Der Verfasser befand sich zur Durchführung einer Befragung kurz vor

Stundenbeginn in einem Leistungskurs der 11. Klasse. Der Kurslehrer war noch nicht eingetroffen. Aus einem circa 1m^2 großen Loch in den Rigipsplatten einer Wand des Physikraums quoll Dämmmaterial hervor. Während der Verfasser den Schaden besah, trat ein Schüler dazu und sagte: "Na, da war wohl mal wieder actio größer als reactio." Auf die Rückfrage "Wieso, ich denke man lernt in der Mechanik, daß actio immer gleich reactio ist?" antwortete der Schüler: "Sieht man doch - offensichtlich nicht immer."

Der Schüler hat den Vorgang in eine aktive Komponente, den Kraft ausübenden Beschädiger, und eine passive Komponente, die Wand, eingeteilt. Der Beschädiger übt eine Kraft auf die Wand aus ('actio'). Die Wand kann selbst keine Kraft auf den Beschädiger ausüben, denn sie ist passiv. Sie leistet Widerstand gegen die angreifende Kraft ('reactio'). Die angreifende Kraft ist jedoch größer als der Widerstand, daher zeigt sich eine Wirkung (Loch). Die Kategorisierung ist lebensweltlich sinnvoll. Sie kann auch physikalisch gedeutet werden: Ein Spitzenmomentanwert der Kraft während des Kraftstoßes übersteigt die Bruchfestigkeit der Platte. Mit dem dritten Newtonschen Axiom - hierauf sollte mit dem Beispiel hingewiesen werden - hat die Verwendung der Termini 'actio' und 'reactio' jedoch wenig zu tun.

B.3.2.2.3

Denkrahmen 7: Zweckdenken

D7: Bei der Deutung physikalischer Vorgänge berücksichtigen Schüler Zwecke oder Ziele, die sie dem Prozeß unterstellen.

Struktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Schüler unterstellen physikalischen Vorgängen Zwecke oder Ziele, die zum Teil aus Analogien zu lebensweltlichen Vorgängen konstruiert werden. Das zugeschriebene Ziel kann die Erklärung des Vorgangs und die Vorhersage seines weiteren Verlaufs beeinflussen. Teilweise wird den beteiligten Körpern ein "Willen" zugesprochen, so z.B. in der Aussage "Die Kugel will ihre Bahn beibehalten".

*

Wir zitieren aus einem Unterrichtsgespräch über die Frage, ob ein Wagen, an dem eine konstante Kraft angreift, auf einer Experimentierfahrbahn gleichbleibend beschleunigt wird.

Otfried Ich meine, daß die Beschleunigung immer kleiner wird. Am Anfang ist ja das Ziel gesetzt, daß die Höchstgeschwindigkeit erreicht wird. Nehmen wir einmal an, die Bahn und das alles funktioniert, dann muß es am Anfang viel schneller beschleunigen, damit es auf die Höchstgeschwindigkeit kommt, als am Ende. Am Ende ist es sowieso schneller. Und da muß es dann nicht mehr so stark beschleunigen, da hat es die Höchstgeschwindigkeit ja erreicht.

Schüler (Zustimmung von verschiedenen Seiten) ... Genau! ... Ja ...

Otfried unterstellt dem betrachteten Beschleunigungsvorgang, er habe den Zweck ("Es ist das Ziel gesetzt, daß ..."), den Wagen auf eine bestimmte Endgeschwindigkeit zu bringen. Temposteigerungen sind lebensweltlich meist auf das Erreichen bestimmter Endgeschwindigkeiten ausgerichtet. Ein solches Ziel wird von Otfried auf den unterrichtlich behandelten Beschleunigungsvorgang übertragen. Die Geschwindigkeit "soll" möglichst schnell erreicht werden. Am Anfang ist die Differenz zum angestrebten Endzustand am größten, also ist eine große Beschleunigung sinnvoll. Bei Annäherung an die Endgeschwindigkeit kann man sich mehr Zeit für die Temposteigerung lassen, da das Ziel schon fast erreicht ist.

*

Der nächste Protokollauschnitt stammt aus einem Unterrichtsgespräch über die Frage, was für eine Bahn ein Körper beschreibt, der mittels eines Fadens im

Kreis herumgeführt wird, wenn man den Faden durchschneidet. Diskutiert wird, ob die Bahn einen Bogen beschreibt oder geradlinig verläuft. Ein ruhendes Bezugssystem ist implizit vorausgesetzt. Die Schüler übertragen das Problem bald auf lebensweltliche Analogien (Schleuderball, Hammerwurf):

Schüler (Die Schüler befinden sich in lebhafter Diskussion untereinander) ... das ist wie beim Schleuderball.

S 1 Aber da ist der Bogen nicht drin.

S 2 Du drehst dich einmal oder zweimal und dann läßt du los.

Lehrer Und dann geht es im Bogen weiter?

S 2 Nur ein ganz bißchen.

Lehrer Ein bißchen Bogen - und dann?

S 3 Das kann ja gar nicht sein. Die Kugel und der Drehpunkt liegen ja fast auf einer Linie. Also würde es ja ein bißchen nach links gehen. Bei Hammerwurf geht das immer geradeaus - auf einer Linie.

Schüler (Zustimmung)

S 3 Sonst gäbe es ja eine Linksabweichung, vorausgesetzt, daß du linksherum drehst.

S 4 Beim Hammerwurf müssen die ja geradeaus fliegen, sonst gäbe es ja keine Weite.

Das Ziel beim Hammerwurf sind große Wurfweiten. Dafür wäre es optimal, wenn der Hammer in der Projektion auf den Boden eine gerade Bahn beschriebe. Daraus wird von Schüler 4 rückwärts geschlossen, daß die Bahn auch so beschaffen ist. Die Erfahrung läßt keine sichere Entscheidung zu, ob die Bahn des Hammers tatsächlich gerade ist oder, wie die des Diskus, gekrümmt. Auf den Vergleich zum Hammerwurf stützten sich im Anschluß verschiedene Beiträge von Schülern, die eine gerade Bahn nach Durchschneiden des Führungsfadens vorhersagten.

B.3.2.2.4

Denkrahmen 8: Formelfixierung

D8: "Physikalische Kompetenz drückt sich in der Kenntnis von Formeln aus. Physikalische Probleme werden durch Anwendung passender Formeln/Gesetze gelöst."

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Die Vorstellung, daß es in der Physik vor allem auf Formel-/Gesetzeskenntnis und Rechenfertigkeiten ankommt, gehört zu den verbreitetsten und wichtigsten Denkrahmen. Weniger Beachtung schenken Schüler der Aneignung von Fähigkeiten zur begrifflichen Einordnung begegnender Phänomene oder der inhaltlichen Durchdringung der verwendeten "Formeln". Denkrahmen 8 beruht auf Erfahrungen mit Schwerpunktsetzungen und Bewertungskriterien im Unterricht. Klausuren im Fach Physik bestehen zu einem gewichtigen Teil aus "Rechenaufgaben", die bei Kenntnis der passenden Formel (die aus den angegebenen und der gesuchten Größe assoziiert werden kann) und deren Auflösung nach der gesuchten Größe durch die Berechnung von Zahlenwerten lösbar sind. In fortgeschrittenen Stadien kommt dazu die Rekapitulation der Herleitungswege bestimmter Sätze. Schüler stellen sich auf diese Art von Aufgaben ein. Schriftliche Antworten in Satzform oder Stellungnahmen zu physikalischen Texten sind unbeliebt. Probleme, die Lösungen qualitativer Art erfordern, z.B. die Erläuterung physikalischer Begriffe oder die prinzipielle Erklärung eines Phänomens, werden als schwierig empfunden. Man kann sich auf Physik Klausuren ähnlich vorbereiten wie auf Mathematikarbeiten. Die typische Frage in der letzten Stunde vor Klausuren lautet "Welche Formeln kommen dran?"

Formeln sind etwas Konkretes, an dem Schüler sich festhalten können. Sie üben eine gewisse Faszination aus. Mit Formeln erhält man genaue Zahlenwerte, d.h. greifbare Ergebnisse in Meter, Kilogramm oder Sekunde. Die Fähigkeit zum Umgang mit Formeln/Gesetzen verleitet zu dem Glauben, damit habe man die Physik verstanden. Qualitative Aussagen zu Phänomenen werden von manchen Schülern als unwichtig, unproduktiv oder gar unphysikalisch abgetan.

Diskutiert man mit Lehrern über das Problem der "Rechenaufgaben" in Klausuren, so trifft man auch bei Kollegen, die die Analyse teilen, auf zwei Einwände:

1. Es ist schwer die Bearbeitung von Aufgaben zu bewerten, deren Lösung nicht an Zahlenwerten oder hergeleiteten Sätzen gemessen werden kann.
2. "Rechenaufgaben" geben schwächeren Schülern die Möglichkeit, Punkte zu

sammeln. Ein großer Anteil von "Denkaufgaben" würde das Anforderungsniveau stark heraufsetzen.

Lassen wir das Problem der Benotung einmal so stehen. Die Argumente im zweiten Einwand stimmen mit der Einschätzung solcher Aufgaben durch Schüler überein. Aufzufangen sind die Schwierigkeiten, wenn im Unterricht ausführlicher über den Gehalt physikalischer Begriffe gesprochen wird und qualitative Betrachtungen verstärkt werden. Das muß auf Kosten der Rechenanteile gehen. Auf die Einübung des formalen Umgangs mit Gesetzen, ihre Umstellung nach den verschiedenen auftretenden Größen oder das Durchrechnen von Beispielen mit willkürlichen Zahlenwerten wird - im Vergleich zu den Unterrichtsanteilen, in denen über die Gesetze gesprochen wird - zuviel Zeit verwandt. Wir stützen diese These auf die Zeitanteile in den uns vorliegenden Unterrichtsprotokollen. Dabei zeichneten sich die Kurse, die für eine empirische Begleitung ausgewählt wurden, gegenüber anderen Kursen durch einen relativ hohen Anteil an Unterrichtsgesprächen über den Gehalt der verwendeten Begriffe und Sätze aus.

Eine unterrichtliche Schwerpunktsetzung bei "Rechenaufgaben" führt z.B. dazu, daß Schüler zwar mit der Beziehung $F = m \cdot a$ in Standardaufgaben umgehen können, daß sie aber über die Bedeutung der Größe 'F' kaum nachdenken. Konzeptuelles Verständnis und Fähigkeit zur formalen Verwendung fallen auseinander. Im Denkraum 8 halten Schüler Unterrichtsphasen, in denen es um die Einführung neuer Begriffe, ihre Begründung oder ihre Abgrenzung von möglichen anderen Konzepten geht, für "Geschwafel". Sie schalten sich erst dann wieder ein, wenn am Ende die "richtige" Formel an der Tafel steht und gerechnet wird.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Reduktion von Unterrichtsinhalten auf Formeln

Der erste Beleg stammt aus der letzten Stunde vor einer Klausur in Kinematik. Im Unterricht waren behandelt worden:

- Fallexperimente mit Papierkegeln (Weg-Zeit-Meßverfahren, Diagramme, Begriff der gleichförmigen Bewegung),
- Bewegungen auf Experimentierfahrbahnen (Aufzeichnungsverfahren, Beschleunigungsbegriff),
- Vermessung der "grünen Welle" auf einer Hauptverkehrsstraße (Berechnung von Schaltzeiten für Verkehrszeichenanlagen, Brems- und Anfahrvorgänge).

Das reichhaltige Programm (besonders auf den dritten Spiegelstrich wurde viel

Zeit verwendet) muß als Hintergrund genannt werden, um erkennbar zu machen, wie stark die Schüler es auf Formeln reduzierten:

S 1 Was kommt denn nun in der Arbeit dran?

Lehrer Was meint ihr denn, was drankommen könnte?

Kurt Das einzige, was wir gelernt haben, ist s durch t . Daraus kann man die Geschwindigkeit berechnen.

S 2 Und jetzt noch die Beschleunigung v durch t .

Deutlicher kann man die Reduktion der Unterrichtsgegenstände auf Formeln, die dann noch verkürzt werden, kaum ausdrücken. In einem anderen Kurs fragten Schüler vor einer Klausur, ob sie einen "Formelzettel" benutzen dürften. Nachdem das vom Lehrer zugestanden wurde, kam als nächste Frage:

Sven Sind alle Aufgaben mit Rechnung?

Lehrer Nein, nicht alles.

Kai Da ist wohl wieder so eine Laber-Aufgabe dabei!

Lehrer Beim schiefen Wurf können wir noch nichts berechnen und beim unelastischen Stoß auch nicht.

Tom (Mit abwertendem Unterton) Wieder so eine Aufgabe, wo man was erzählen darf.

Eine Aufgabe ohne Rechnungen ist für Kai eine "Laber-Aufgabe". Kai bezieht sich mit "wieder" auf eine Aufgabe der vorhergehenden Klausur, die lautete: "Schildere die beiden Positionen bezüglich des Begriffs 'Beschleunigung', wie sie in dem von uns besprochenen Auszug aus Galileis Buch vertreten werden." Der Auszug stammte aus den 'Discorsi'. Es ging um die beiden alternativen Definitionen $a = \Delta v / \Delta t$ oder $a = \Delta v / \Delta s$. Tom vermerkt abwertend, daß man da "was" erzählen dürfe. Gemeint ist wohl, man könne oder müsse bei einer solchen Aufgabe etwas ziemlich Beliebiges hinschreiben.

*

Auseinanderfallen von Rechenfertigkeiten und Begriffsverständnis

Das Auseinanderfallen der Fähigkeit zur formalen Anwendung eines Satzes und einem fehlenden Verständnis seiner Bedeutung kommt in einem längeren Ausschnitt aus einer Stunde über das Unabhängigkeitsprinzip beim Wurf zum Ausdruck. In den vorhergehenden drei Unterrichtsstunden war der waagerechte Wurf eingeführt und verschiedene Aufgaben (Abwurfgeschwindigkeit, Wurfweite, Auftreffwinkel) dazu gerechnet worden. Zu Beginn der vorliegenden Stunde wurden zwei Aufgaben, die als Hausarbeit aufgegeben waren, an der Tafel von Schülern (Kurt und Lisa) vorgerechnet. Im Anschluß fragt der Lehrer:

Lehrer Ihr könnt jetzt also alle solche Aufgaben rechnen?

Nils Nein.

Lehrer Dann müßtest du eine Frage haben.

Nils Was mich daran stört, sind die ganzen Abkürzungen usw. Da steig ich nicht durch. v_x , v_y usw. was heißt das?

(Die Frage wird im Klassengespräch geklärt.)

(...)

Lehrer Wenn du jetzt weißt, was die Bezeichnungen sind, kannst du jetzt die Aufgabe lösen, Nils?

Nils Ja, anhand der Formel.

Lehrer Sind dir denn die Formeln klar? Es hat ja keinen Zweck, die Formeln auswendig zu lernen und dann zu hoffen, daß man schon die richtige bei einer Aufgabe erwischt. Wozu braucht man z.B. die Unterscheidung in v_y und v_x ?

Schüler (langes Schweigen)

Es deutet sich an, daß die zum Wurf bis dahin gerechneten Aufgaben eher formal gelöst worden waren ("Anhand der Formel"). Fast alle Schüler hatten die Hausaufgaben erfolgreich bearbeitet. Die dem Formalismus zugrundeliegenden grundsätzlichen Überlegungen zum Wurf scheinen dagegen weit weniger verarbeitet worden zu sein. Das gilt bereits für die kinematischen Grundgleichungen, wie sich zeigen wird. Positiv und durchaus nicht üblich ist, daß ein Schüler (Nils) diesen Zustand zur Sprache bringt.

Thomas Warum ist eigentlich v_y gleich g mal t ?

Hubert (erklärt Thomas über den Satz des Pythagoras, warum mathematisch gilt: $v^2 = v_x^2 + v_y^2$)

Lehrer Ich glaube, Thomas wollte eigentlich wissen, warum v_y gleich g mal t ist. Was für eine Art von Bewegung ist das eigentlich in y -Richtung?

Thomas Abwärts.

Lehrer Und was haben wir - was wissen wir, um so eine Abwärtsbewegung zu beschreiben?

Thomas Dafür haben wir doch - das g da.

Lehrer Und was ist das für eine Konstante? Was gibt das an, dieses Ding?

Nils Also, eine Geschwindigkeit.

Lehrer Ist g eine Geschwindigkeit?

Conrad Eine Beschleunigung.

Lehrer Ja, Erdbeschleunigung. Und wenn man eine beschleunigte Bewegung hat, wie kann man dann die Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt ausrechnen?

Bernd Steigungsdreieck.

Lehrer Ja, wenn man die richtige Steigung hat, kann man hoffen, damit zu Rande zu kommen. Aber welche Gleichung liefert uns die Geschwindig-

keit zu jedem Zeitpunkt - bei einer beschleunigten Bewegung? - -

Schüler (lange Pause)

Lehrer Wer kann noch einmal in Worte fassen, was Beschleunigung ist?

Schüler (blättern in ihren Heften; längere Pause)

Eine grundsätzliche Einordnung der Abwärtsbewegung als beschleunigte Bewegung wird von den Schülern nicht vorgenommen. Die Einfälle sind mehr formaler Art - von Huberts Antwort auf Thomas' Frage bis hin zu Bernds Einwurf "Steigungs-dreieck". Die Aufforderung, die Bedeutung des Begriffes Beschleunigung in Worte zu fassen, bleibt lange unbeantwortet.

Kurt (liest aus seinem Heft vor) Wie lange ein Gegenstand von einer - zu einer bestimmten Geschwindigkeit braucht.

Lehrer Das ist das, was wir ganz zu Anfang gesagt haben, bevor wir gemessen haben. - - - Ja, die Änderung der Geschwindigkeit pro Zeit. Wenn ich die Änderung pro Zeit habe, wie kann ich dann die Geschwindigkeit ausrechnen?

Conrad Geht das mit $s = 1/2 a \cdot t^2$?

Lehrer Wir wollen die Geschwindigkeit haben.

Conrad Ach so, die Geschwindigkeit. Da haben wir doch - - (sucht in seinem Heft) $v = a \cdot t$.

Der Vorsatz in der Lehrerfrage "Wenn ich die Änderung pro Zeit habe, wie kann ich dann die Geschwindigkeit ausrechnen?" ist als Anregung eines qualitativen Denkens gemeint: Beschleunigung ist Geschwindigkeitsänderung pro Zeit, also ist die Geschwindigkeit(sänderung) gleich Beschleunigung mal Zeitraum. Conrad umgeht den Schritt solchen sprachlichen Durchdenkens und versucht direkt, die richtige Formel zu assoziieren. In seinem Heft stehen zwei Formeln, in denen 'a' vorkommt. Beim zweiten Mal hat er die passende Formel gefunden. (Die erste konnte nicht richtig sein, denn in ihr taucht kein 'v' auf.)

Der Lehrer erkannte die Notwendigkeit, die kinematischen Beziehungen zu wiederholen und ihre Bedeutung zu veranschaulichen. In dem Unterrichtsabschnitt fiel es den Schülern schwer, die Gleichungen in einfache Worte zu fassen. Wir zitieren einen weiteren Ausschnitt:

Lehrer Was versteht man unter einer gleichförmigen Bewegung?

Schüler (lange Pause)

Nils Ich würde sagen, daß etwas proportional ansteigt.

Lehrer Was?

Nils Sagen wir, daß die Zeit proportional zum Weg immer ansteigt.

Lehrer Wie kann man das umgangssprachlich beschreiben?

Nils Je größer die Zeit, desto größer der Weg.

Lehrer Das würdest du so auch nicht sagen.

Nils Doch, würde ich sagen.

Lehrer Wetten nicht?

Wilfried Also, daß ich z.B. im Auto gleich schnell fahre.

Lehrer Genau. Du würdest sagen, die Geschwindigkeit ist konstant; ich fahre immer gleich schnell.

Vielleicht erschien Nils eine Formulierung, wie die von Wilfried, als zu einfach. Sicherlich verkürzt auch die Aussage des Lehrers den Begriff der gleichförmigen Bewegung. Physikalische Begriffe und Sätze sind in umgangssprachlichen Umschreibungen immer nur verkürzt darstellbar und bestimmter Merkmale beraubt. Ihre produktive Handhabung ist jedoch auf eine Verknüpfung mit heuristischen Vorstellungen angewiesen, andernfalls verkommen sie zu Formalismen, und ihr Gehalt bleibt im Grunde unverstanden. Die Behauptung, man könne/dürfe sich zu Begriffen wie Impuls, Energie oder Feld keine anschaulichen Vorstellungen machen, behindert die Umsetzung der angebotenen Konzepte durch den Lerner zu handhabbaren Strukturierungsmitteln für Erfahrung. Erst nach dem Durchlaufen einfacher anschaulicher Vorstellungen wird ein Begriff oder eine Theorie auf abstrakter, mathematisierter Ebene verstehbar. Eine Formalisierung macht keinen Sinn, bevor die Grundidee des Konzepts erfaßt ist.

*

Aus einer Unterrichtseinheit zur Einführung des Impulsbegriffs am unelastischen Stoß stammt das nächste Beispiel. Der Impuls wurde anhand intuitiv-spekulativer Annahmen über die gemeinsame Geschwindigkeit zweier Körper gleicher Masse nach einem unelastischen Stoß motiviert. Die Schüler vermuteten aus einem intuitiven Erhaltungsdenken, daß gelten werde: $v'_{1+2} = 1/2 v_1$, wenn sich der Körper 2 vor dem Stoß in Ruhe befindet. Dazu wurden entsprechende Experimente gemacht. Der Impuls wurde als neuer Name für das Produkt $m \cdot v$ festgelegt und seine Erhaltung auf beliebige Geschwindigkeiten und Massen verallgemeinert.

Dieser Phase schlossen sich über 2 Unterrichtsstunden ausführliche Rechnungen zur Impulserhaltung an. Es wurden Massen und Geschwindigkeiten vor und nach einem unelastischen Stoß in den verschiedensten Kombinationen und mit willkürlichen Zahlenwerten berechnet. Am Ende der zweiten Stunde meldete sich Rainer mit der Frage: "Was bedeutet eigentlich Impuls? Ich kann mir darunter nichts vorstellen." Andere Schüler pflichteten ihm bei. Der Lehrer gab die Frage an die Klasse weiter, aber kein Schüler konnte Rainer auch nur in Ansätzen

weiterhelfen. Der Lehrer erläuterte den Impuls als eine Größe, die es aufgrund ihres Erhaltungscharakters erleichtere, Bewegungszustände beim unelastischen Stoß zu berechnen. Anschauliche Umschreibungen wie "Wucht" wurden nicht angesprochen. Auch wenn "Wucht" den Vektorcharakter des Impulses nicht zum Ausdruck bringt, so vermittelt die Umschreibung doch einen Anhaltspunkt, an dem sich das Konzept entwickeln kann. "Bewegungsstärke" oder "Bewegungssumme" wären andere Versprachlichungen. Ohne solche, zugegebenermaßen groben, Veranschaulichungen wird der Impuls nicht zu einem Werkzeug bei der Beschreibung von Bewegungsvorgängen. Bei der Einführung des elastischen Stoßes beschrieb kein Schüler aus diesem Kurs den Vorgang unter Verwendung des Impulsbegriffs oder des Impulserhaltungssatzes. Dafür wurde viel über "Kraftübertragung" gesprochen, ohne jedoch die Nähe dieser Vorstellung zum behandelten Impulsbegriff zu erkennen.

In einem anderen Unterrichtsabschnitt über den Zusammenhang zwischen Impulsänderung und Kraft ergab sich der folgende Dialog:

Robert Ich weiß gar nicht, was ich da machen soll.

Lehrer Ja, was ist denn Impuls?

Robert Was ist Impuls - was soll ich denn da sagen. Da könnte man viel sagen.

Lehrer Das kann man ganz klar sagen.

Robert Ja, m mal v , also Masse mal Geschwindigkeit.

Lehrer Ja genau, damit ist doch alles gesagt, oder?

Hier handelt es sich um ein besonders auffälliges Beispiel für die Förderung von Formelfixierung im Unterricht. Vieles läuft eher unschwellig ab, besonders über das zeitliche Verhältnis zwischen Rechnungen mit den eingeführten Begriffen und Gesprächen über ihren Gehalt. Schüler und Lehrer setzen die Fähigkeit zur korrekten Verwendung einer Größe in Rechnungen zu direkt mit ihrem inhaltlichen Verständnis gleich.

*

In einem Leistungskurs wurde das Problem gestellt, die zum Spannen einer weichen und einer harten Feder bis zu einer bestimmten Spannkraft erforderliche Arbeit zu berechnen. Alle Schüler kamen unter Heranziehung der Beziehungen ' $E_{\text{Spann}} = 1/2 D \cdot x^2$ ' und ' $F_{\text{Spann}} = D \cdot x$ ' zu dem korrekten Ergebnis, daß bei der weichen Feder mehr Arbeit verrichtet werden muß. Kein Schüler zeigte sich davon überrascht. Auf die Frage des Lehrers, ob das Ergebnis nicht verwunderlich sei, kam die Antwort: "Warum? Die Formeln ergeben das ja so." Hätte man

die Schüler vorher nach einer Prognose gefragt, hätte die Mehrheit wohl auf die harte Feder getippt.

*

Formelfixierung im SVU

Bei der Durchsicht der Themen von Gruppenarbeiten in verschiedenen SVUs ergibt sich, daß ein großer Anteil von Untersuchungszielen in der Aufstellung oder Bestätigung von Formeln besteht. Einige Beispiele: (Anführungsstriche kennzeichnen wörtliche Zitate; sonst handelt es sich um eine Rekonstruktion aus der Vorgehensweise der Gruppe):

- Welcher formelmäßige Zusammenhang besteht zwischen der Ablenkung des Elektronenstrahls in einer Braunschen Röhre und dem Strom durch die Ablenspulen.
- "Etwas Genaues rausfinden über Induktion (Formeln). Das Prinzip ist ja Allgemeinwissen."
- Überprüfung des Satzes ' $m \cdot g \cdot h = 1/2 m \cdot v^2$ ' für die Energieerhaltung beim Fadenpendel. (Die Formel war im Buch gefunden worden.)
- "Eine Formel für die Drehzahl eines E-Motors aufstellen." (Als Parameter wurden Windungszahl und Stromstärke der Feldspulen berücksichtigt.)
- Wie hängt die Stauchung einer Spiralfeder ab von der Masse und der Ablaufhöhe einer Kugel, die eine schiefe Ebene herunterrollt und gegen die Feder stößt.
- "Gibt es eine einfache Funktion/Formel für die Sprunghöhe eines Tischtennisballs." (Parameter war die Anzahl der Reflexionen.)
- "Abhängigkeit der Feldstärke vom Abstand zweier Leiter experimentell herausfinden, weil das im Buch nicht drinsteht."
- "Wie hängt die Übertragung der Kraft beim Zusammenstoß zweier Wagen von der Geschwindigkeit und der Masse ab."

Die Liste ließe sich verlängern. Das Bemühen der Gruppen bestand manchmal darin, einen formelmäßigen Zusammenhang zwischen willkürlich gewählten Größen herzustellen. Wenn das nicht gelang, wurde der Ausgang der Arbeiten als unbefriedigend empfunden. Qualitative Ergebnisse, z.B. die genaue Erfassung der Bewegungsabläufe beim sogenannten Managerspiel, wurden als unwichtig betrachtet - und das obwohl die Lehrer und der Verfasser in Gruppengesprächen darauf hinwiesen, daß Themenstellungen im SVU keineswegs in der Produktion von Formeln zu bestehen bräuchten.

Ein besonderer Fall von Formelfixierung soll zum Abschluß geschildert werden. In einem SVU zum Thema Magnetismus befaßte sich eine Gruppe mit der Vermessung von Magnetfeldern mit Hallsonden. Im Schulbuch wurde die Formel

' $B \sim 1/r$ ' für das Magnetfeld B eines geraden Leiters im Abstand r gefunden. Als Thema ihrer Experimente formulierten die Schüler: "Abhängigkeit des Hall-Effekts vom Strom durch die Spule und von $1/r$ untersuchen". Den Schülern gelang es in langwierigen Meßreihen die $1/r$ -Abhängigkeit der Hallspannung vom Abstand sowohl für eine stromdurchflossene Spule als auch für einen Hufeisenmagneten (Abstand von einem Pol) zu bestätigen.

B.3.2.2.5 Denkraumen 9: Analogiedenken

D9: Schüler versuchen, Antwort auf gestellte Aufgaben dadurch zu finden, daß sie die Probleme auf vermeintlich äquivalente Fälle mit bekannter Lösung abbilden.

Struktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Die Disposition zum Aufsuchen von Analogien wird besonders bei Denkaufgaben aktiviert. Die Schüler ziehen Parallelen zu Fällen, die sie für strukturgleich halten und deren Lösung sie zu kennen meinen. Jung (1981a, 20f) spricht in einem ähnlichen Zusammenhang von einer "episodischen Organisation der Erfahrung". Die Alternative zu dieser Herangehensweise besteht in dem Bemühen, die gestellte Aufgabe oder das begegnende Phänomen auf eine Theorie abzubilden und die Lösung mit Hilfe der dort bereitgestellten Begriffe und Sätze zu suchen.

Die Suche nach Analogien ist bei solchen Problemen eine sinnvolle Strategie, die auf der Grundlage des verfügbaren theoretischen Wissens nicht lösbar erscheinen. Das setzt den Versuch der Anwendung bekannter Strukturierungsmittel voraus. Schüler lassen diesen ersten Schritt besonders dann aus, wenn das Problem von seinem äußeren Erscheinungsbild an bekannte Fälle erinnert. Sie eignen sich nicht so sehr systematische Vorgehensweisen an, die für eine Vielzahl unterschiedlicher Fälle Zugangsmöglichkeiten eröffnen, sondern speichern bestimmte Lösungen für bestimmte Fälle ab. Der Unterricht muß vermitteln, daß physikalische Kompetenz sich mehr in der Fähigkeit zur Einordnung spezieller Probleme in allgemeingültige theoretische Strukturen ausdrückt als in der Verfügung über Speziallösungen für Einzelfälle.

Diskussion des Elements an Beispielen

In Aufgabe B2 des Tests DAM (siehe Punkt B.2.2.2) zeichneten 43% der Schüler ($N = 226$) einen Graphen in das v - t -Diagramm ein, der deutlich über den Zeitpunkt t_1 (Ende der Beschleunigungsphase) hinaus ansteigt. Die Annahme, nach Verlassen des Schußapparats nehme die Geschwindigkeit der Kugel weiter zu, wurde in Nachbesprechungen von Schülern damit begründet, daß die Aufgabe analog zum Abschuß einer Gewehr-kugel zu sehen sei. Eine Gewehr-kugel, so wurde behauptet, werde nach Verlassen des Laufes noch eine gewisse Zeit lang schneller. Ein Schüler fragte sogar, ob die Zeitpunkte t_0 bis t_7 der Momentaufnahmen der Bewegung gleiche Abstände haben sollten. Das dürfe nicht so sein,

da die Kugel dann nicht weiter beschleunige, was sie aber tatsächlich täte, wie man von Gewehren her wisse.

Wie viele der falschen Antworten auf solchen oder ähnlichen Übertragungen des Problems beruhen (z.B. Raketenabschuß), ist nicht festzustellen. Jedenfalls haben 43% der Schüler weder eine Einordnung des Problems in den Zusammenhang von äußerer Kraft und Beschleunigung vorgenommen, noch aus der Ort-Zeit-Darstellung kinematisch auf ein konstantes Tempo ab dem Zeitpunkt t_1 geschlossen.

*

Denkaufgabe B4 der Erhebung DAM (siehe B.2.2.2) sollte unter anderem die Disposition zum Analogiedenken untersuchen. In der Formulierung 1, in der von Waagschalen gesprochen wird, liegt eine falsche Analogie zur Balkenwaage näher als in der zweiten Formulierung, bei der die Gewichtsstücke an Haken befestigt sind. Im Text der zweiten Version werden jegliche Bezüge zu einer Waage vermieden. Aus einigen Antworten kann direkt abgelesen werden, daß der Denkrahm D9 fungiert hat:

- "Der Schlitten wird stark abgebremst und pendelt sich in der Mitte zwischen den beiden Gewichten ein (nach dem Prinzip einer Waage)."
- "Die Waagschalen pendeln sich so ein, daß sie sich auf gleicher Höhe befinden."

In Nachbesprechungen stimmten Schüler häufig zu, wenn ihnen als mögliche Ursache ihrer falschen Antworten eine Gleichsetzung mit einer Balkenwaage genannt wurde.

Der Prozentsatz der richtigen Antworten war mit 40% ($N = 124$) und 43% ($N = 129$) bei beiden Formulierungen der Aufgabe B4 etwa gleich groß. Bei der Waagschalen-Version schrieben jedoch deutlich mehr Schüler, der Schlitten gleite zur Mitte zurück, bzw. pendele sich dort ein (26% gegenüber 15% bei der Haken-Version). Es ist dort die häufigste falsche Antwort. In der zweiten Version lautet die verbreitetste falsche Antwort, der Schlitten komme langsam zum Stehen (24%; 16% bei Version 1).

Die Unterschiede in den Beantwortungen liegen demnach nicht in einer generellen Veränderung der Anteile richtiger und falscher Antworten, sondern in einer Verschiebung innerhalb der falschen. Man kann vermuten, daß ein gewisser Teil der Schüler unabhängig von der Formulierung des Problems eine Abbildung auf die Newtonschen Axiome vorgenommen hat, während der andere Teil eher unsystematisch-intuitiv herangegangen ist und dann die in Version 1 näher liegende

Analogie zur Waage durchschlag.

*

Auch der dritte Beleg zum Analogiedenken stammt aus den Ergebnissen der Erhebung DAM. In Aufgabe 6 wurde nach der Beschleunigung zweier Holzklötze unterschiedlicher Massen auf einem Luftkissentisch gefragt (siehe B.2.2.2). 44% der Schüler (N = 254) meinten, die beiden Klötze würden vom gleichen Beschleunigungsgewicht gleich stark beschleunigt. In den teilweise ausführlichen Antworten auf Item B6 findet man 2 Typen von Begründungen:

1. Bei Reibungsfreiheit spielt die Masse für die Beschleunigung keine Rolle.
2. Die Verhältnisse sind wie beim freien Fall.

Auf die Verkopplung von Reibungs- und Trägheitseffekten gehen wir an anderer Stelle ein (B.3.3.2.5). Im zweiten Fall wird die Antwort auf einer vermeintlichen Strukturgleichheit des Problems mit dem freien Fall aufgebaut. Das 2. Newtonsche Axiom findet keine Anwendung. Das Problem verbleibt auf der gleichen Ebene; es wird nicht unter allgemeinen Prinzipien betrachtet.

- "Da alle Massen mit derselben Beschleunigung zur Erde fallen, werden auch hier beide Körper gleich schnell beschleunigt, da sie ein Teil der Masse sind und der Faden ein Verbindungsstück zur anderen Masse ist."
- "Abgesehen von der Reibung des Seils und dem größeren Luftwiderstand vom großen Klotz, fallen die beiden gleich schnell. Ich nehme als Versuchsorientierung den freien Fall im luftleeren Raum mit der Feder und einer Stahlkugel."

Im Analogiedenken zum freien Fall kann auch die Ursache der wenigen Antworten gesehen werden, nach denen der große Klotz schneller beschleunigt wird. Diese Schüler gehen von einer Abhängigkeit der Fallzeit vom Gewicht des Körpers aus. Beispiele für Antworten:

- "Der große Klotz bewegt sich schneller, weil er schwerer ist."
- "Der große Klotz wird mehr beschleunigt, weil die Reibung aufgehoben wird und er mehr Masse hat als der kleine."

B.3.2.2.6 Denkrahen 10: Ursprungseinbeziehung/globales Denken

D10: Bei der Beschreibung eines Prozeßverlaufs und der Vorhersage seines Fortgangs wird der Prozeßbeginn und der bisherige Verlauf in die Überlegungen einbezogen. Wenn diese Faktoren durch die Problemstellung nicht gegeben sind, wird versucht, sie zu rekonstruieren.

Struktur des Vorverständniselements

Das Vorverständniselement D10 wirkt sich speziell bei der Vorhersage der Entwicklung von Bewegungsabläufen aus. Bei Aktivierung des globalen Denkens tendieren Schüler dazu, für die Prognose nicht allein Ort, Impuls und äußere Kräfte heranzuziehen, sondern die Form der bisherigen Bewegung und postulierte Vorgänge beim In-Bewegung-Setzen mitzubedenken. Viennot (1979) ist aufgrund von Untersuchungen des "spontanen Denkens" von Schülern und Studenten in der Mechanik zur Unterscheidung eines "lokalen" und eines "globalen" Typs der Analyse von Bewegungen gekommen. Der zweite Typ, der unserem Denkrahen 10 entspricht, führt nach Viennots Feststellungen zur Bildung einer "Kraftvorsrats-Vorstellung" ("supply of force"). Diese Ergebnisse haben sich in unseren Erhebungen bestätigt. Ursprungseinbeziehung wirkt sich in der Tat besonders darin aus, daß Schüler Körper, die sich in Bewegung befinden, mit einer 'Kraft' ausstatten, die beim Vorgang des In-Bewegung-Setzens vom Beweger auf den Körper übergeht. Dadurch werden bewegte Körper in die Lage versetzt, an anderen Körpern Wirkungen zu erzielen, z.B. durch Stöße. (Das Präkonzept, bewegte Körper "hätten" Kraft, wird unter Punkt B.3.3.2.2 im einzelnen dargestellt.) Des weiteren kann die Vorstellung, ein Körper, der sich auf einer Kreisbahn bewege, behalte tendenziell auch nach Wegfall der Zentralkraft die Kreisbahn bei, auf den Denkrahen der Ursprungseinbeziehung zurückgeführt werden.

Diskussion des Elements an Beispielen

Erhaltung der Kreisbewegung

Die Frage, die im nachstehenden Unterrichtsabschnitt gestellt war, lautete: Wie bewegt sich ein Körper, der an einem Faden im Kreis herumgeführt wird, nach Durchschneiden des Führungsfaden weiter? Im zugehörigen Experiment legt man eine Kugel auf eine große Drehscheibe, die langsam in Rotation versetzt wird. Die Kugel ist über einen Faden an einem Punkt über dem Zentrum der Scheibe befestigt. Die geringe Rollreibung sorgt dafür, daß die Kugel von der Scheibe

mitgenommen wird. Der Lehrer erklärte die Versuchsanordnung und stellte dann die obige Frage. Nach einer längeren Pause meldete sich Mike:

Mike Dann wird die Kugel runterfallen. Die wird durch die Fliehkraft nach außen gedrückt.

Claus Fliehkraft würde ich nicht unbedingt sagen. Ich würde sagen durch die Trägheit. Diese Kugel hat ja eine bestimmte Richtung, in der sie ihre Geschwindigkeit hat, und die will sie ja beibehalten. Wenn das Seil da durchgeschnitten wird, dann ändert es ja nicht mehr die Richtung der Kugel und dann fällt sie runter.

Ludwig Ich würde sagen, die erfährt eine Beschleunigung vom Mittelpunkt der Scheibe weg.

Der Lehrer führt den Versuch einmal durch. Die Schüler sitzen auf ihren Plätzen, können also die Bahn nur schlecht sehen.

Lehrer Wenn die so runterfällt - Kann man die Bahn, die sie vor dem Runterfallen hat, beschreiben?

Detlev Tangente.

Lehrer Wir machen hier mal ein paar Kreise und jeder kann seine Vermutung da mal einzeichnen.

Arnim In Bezug auf die Scheibe oder in Bezug auf die Zuschauer von oben?

Ludwig Beides.

Lehrer Wenn du dazu eine Äußerung machen willst, welchen Bezug du haben willst, dann mach die. Wer kann mal seine Vermutung hier einzeichnen?

Peter Also von oben gesehen - (zeichnet). Ich würde annehmen, daß die irgendwie so geht.

Arnim Von der Scheibe aus gesehen, wird das einfach gerade rausgetragen.

Lehrer Zeichne mal ein. (schreibt unter Peters Zeichnung "ruhender Beobachter")

Arnim (zeichnet) Einmal für den ruhenden Beobachter - - und einmal in Bezug auf die Scheibe.

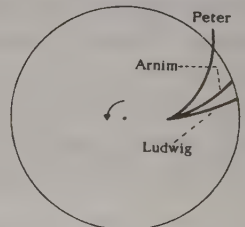
Lehrer Seid ihr da alle so mit einverstanden?

Ludwig Ich meine, die Kurve von Arnim ist nicht genau genug, die linke.

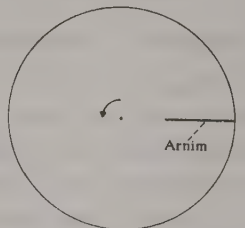
Lehrer Ja, zeichne doch ein, was du meinst.

Ludwig (zeichnet) Das ist auch noch nicht so ganz genau, aber wenn die Kugel hier weiter nach außen kommt, ist die Kraft nach außen stärker, weil die - die Geschwindigkeit draußen am Rand der Scheibe ist ja schneller.

Lehrer Seid ihr alle so derselben Meinung? - - Wie kann man jetzt die Fragen beantworten, ob



"ruhender Beobachter"

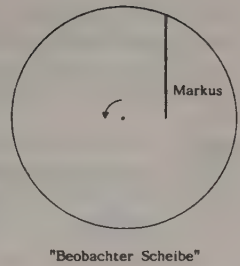


"Beobachter Scheibe"

das auch so stimmt? - Ihr seid da jetzt alle so mit einverstanden, was da steht?

Schüler Ja!

Markus Also, beim zweiten, beim Bezugssystem Scheibe, würde ich den Verlauf nach rechts gerade weg machen. (zeichnet) Weil, wenn man das hier durchgeschnitten hat, hat ja die Kugel eine Richtung nach rechts. Und wenn man auf der Scheibe ist, dann sieht das so aus, als wenn die Kugel so gehen würde - Aber nur wenn man auf der Scheibe ist.

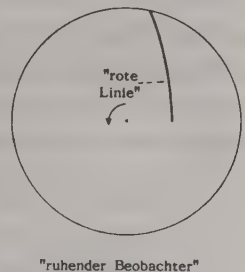


Peter, Arnim und Ludwig zeichnen eine gekrümmte Bahn. Die ersten, spontanen Einfälle sind überwiegend davon geprägt, daß der Typus der Kreisbewegung, die die Kugel vor dem Durchschneiden des Fadens durchlaufen hat, sich in Form einer Bahnkrümmung auf die Bewegung danach auswirkt. Der ursprüngliche Kreis wird durch die "Fliehkraft" aufgebogen. Die drei Vorschläge unterscheiden sich lediglich in der Stärke der Krümmung.

Dadurch, daß die Schüler von sich aus Unterscheidungen zwischen verschiedenen Beobachtungsstandpunkten vornehmen (Bezugssysteme waren noch nicht behandelt worden!), erhöht sich die Signifikanz der Aussagen. Die Bewegung der Kugel verläuft im ruhenden System vorher auf einer Kreisbahn. Daher meinen die Schüler, der Charakter des bisherigen Verlaufs setze sich im Ruhesystem fort. Für das mitbewegte System werden gerade, tangentielle bzw. radiale Bahnen vorhergesagt, da hier vor dem Durchschneiden keine Krümmung gegeben ist.

Bei Claus finden wir den Gegentyp zur Ursprungseinbeziehung. Claus, leistungsstärkster Schüler des Kurses, betrachtet das Phänomen lokal. Die Kugel hat im Moment des Durchschneidens eine bestimmte Richtung, und da keine Kraft auf sie einwirkt, behält sie ihre Geschwindigkeit bei.

Nach mehrmaliger Durchführung des Experiments einigten sich Schüler und Lehrer auf die nebenstehende Bahnkurve ("rote Linie") für die Bewegung der Kugel vom Standpunkt des ruhenden Beobachters. Die Bahn ist aufgrund der Rollreibungskraft zwischen Kugel und Holzscheibe bei dem Experiment tatsächlich leicht zum Zentrum der Scheibe hin gekrümmt. Im folgenden geht es um die Erklärung dieser Beobachtung. Aus dieser Phase zitieren wir drei Schülerausagen:



Lehrer Ich glaube, es ist Konsens, daß es die rote Linie war, die wir gesehen haben. Wie läßt sich das erklären, wie die zustandekommt?

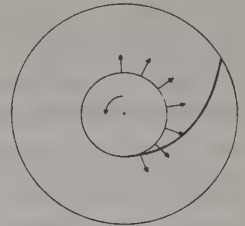
Jörg Das kommt aus einer Bewegung nach außen, durch die Fliehkraft oder so, einer Bewegung auf der Kreisbahn und dann noch die Reibung.

(...)

Arnim Die Kugel hat ja außen die gleiche Geschwindigkeit, die sie innen hatte, beibehalten. Wenn sie meintwegen innen in einer Sekunde einmal rum ist, dann legt sie außen auch die gleiche Bahn zurück. Deswegen ist das dann eben keine Kreisbahn, sondern eben der zehnte Teil einer Kreisbahn, aber die dreht sich auf jeden Fall immer noch in die Richtung, in die sich die Kugel auch vorher bewegt hat.

(...)

Detlev Ich habe mir noch etwas ganz Neues ausgedacht. (geht an die Tafel und zeichnet) Wenn die Kugel jetzt so rollt, dann wird sie durch die Fliehkraft beeinflusst - ungefähr so. (zeichnet die kleine Pfeile ein) Und dann wird die Kugel immer nach außen gezogen, und dann ergibt sich die rote Linie.

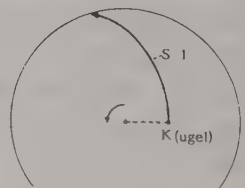


Jörg, Arnim und Detlev erklären das Zustandekommen der "roten Linie" mit einer Überlagerung der ursprünglichen Kreisbewegung und einer zusätzlichen, durch die "Fliehkraft" bewirkten Bewegung nach außen. Arnim spricht den Gedanken der Kreisbahnerhaltung klar aus: "Die dreht sich auf jeden Fall immer noch in die Richtung, in die sich die Kugel vorher bewegt hat". Detlevs Idee ist ein Ad-hoc-Einfall, der auf globales Denken zurückgeht und auf die Vorstellung, daß bei Drehbewegungen immer, d.h. unabhängig vom Bezugssystem, eine Kraft nach außen wirkt (vgl. Punkt B.3.4.2).

*

In einem anderen Kurs (Grundkurs 11. Klasse) ergaben sich am gleichen Thema sehr ähnliche Schüleraussagen zum Verlauf der Bewegung nach Wegfall der Zentralkraft. Der Denkraum der Ursprungseinbeziehung fungierte wiederum erkennbar bei einem Großteil der Schüler, die sich am Unterrichtsgespräch beteiligten.

S 1 Ich würde sagen, wenn jetzt der Faden durchgeschnitten wird und die Platte dreht sich - Die Kugel wird nach außen getragen. Sie wird dann irgendwann die Platte verlassen. Irgendwie so - (zeichnet die nebenstehende Bahn ein)



Lehrer Und das würden Sie jetzt so sehen? Ist das

jetzt das Bild, das Sie sehen würden, wenn Sie sich danebenstellen?

S 1 Ich weiß nicht, ob das jetzt genau diese Bahn ist. Aber auf jeden Fall auf einer Kreisbewegung.

Lehrer Das ist so eine Art gekrümmter Kreis?

S 1 Ja, so eine gekrümmte Bahn, genau.

Die Frage des Bezugssystems ist hier noch nicht aufgekommen. Der Lehrer verweist in seiner Nachfrage indirekt auf das ruhende System.

Lehrer Sind alle der Meinung? Marlies, Sie schütteln den Kopf. Was hätten Sie gedacht?

Marlies Ich hätte erstmal gedacht, daß die Kugel auch außerhalb des Kreises fliegt. Ich meine auch, es ist ein Kreis, aber der Kreis müßte größer sein, nicht so wie hier.

S 2 Also, vielleicht müßte man mal die Bahn - ja, wie sie weiterfliegt, einzeichnen. (zeichnet)

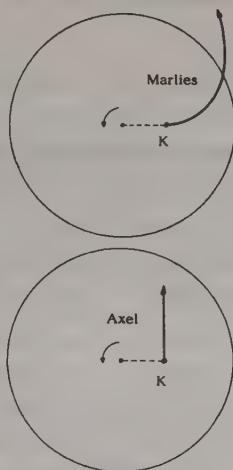
(...)

Axel Das geht nicht rund raus. Das müßte so gerade gehen - mit einem rechten Winkel zum Radius. (zeichnet)

Lehrer Ah so. Das ist nun etwas Neues, nicht? Keine gekrümmte Bahn mehr, sondern eine gerade Bahn.

(...)

S 3 Es müßte eigentlich eine Kurve geben, weil die Kugel ja diese Bewegung durch das Drehen hat. Der Bogen müßte schon da sein.



Wir haben das Protokoll gekürzt wiedergegeben. Neben Axel sprachen sich noch 2 andere Schüler für eine gerade Bahn aus. Die Mehrheit ging jedoch von einer gekrümmten Bahn aus (im Inertialsystem!). Ebenso wie im vorigen Kurs erklärten einige Schüler die vermutete Bahn als Überlagerung der "Eigenbewegung der Kugel", die durch die vorher absolvierte Kreisbewegung gleichsam eingepreßt sei, und einer "Kraft nach außen". Es wurde erwogen, daß die Drehzahl der Scheibe einen Einfluß auf den Bewegungsverlauf nach Durchschneiden des Führungsfadens hat.

Corinna Ich würde sagen, bei ganz geringen Geschwindigkeiten rollt die Kugel auf der Kreisbahn weiter, auf der sie vorher gelaufen ist. Bei hohen Geschwindigkeiten nähert sich das immer mehr der Geraden an.

(...)

S 3 An sich müßte sich das doch ausgleichen, so daß das sowohl bei langsamen als auch bei schnellen Geschwindigkeiten dieselbe Bahn gibt. Bei langsamen ist diese Eigenbewegung - die Drehung - nicht da, mit der das ja normalerweise weiterdreht, und gleichzeitig ist die Kraft, die

nach außen wirkt, nicht so groß. Und wenn die Geschwindigkeit größer wird, ist die Kraft auch wieder größer. Das kann eigentlich kein großer Unterschied sein zwischen verschiedenen Geschwindigkeiten. Diese nach außen wirkende Kraft hängt ja wahrscheinlich mit der Geschwindigkeit zusammen. Und wenn die Geschwindigkeit geringer ist, dann wirkt das auch nicht soviel nach außen. Dafür ist aber auch die Drehbewegung dann nicht so groß.

Wir erkennen deutlich, wie Schüler in ihre Überlegungen zum Fortgang eines Bewegungsverlaufs die "Bewegungsgeschichte" einbeziehen. Die Vorstellung der "Kreisbahnerhaltung" ist aus dem Denkrahm der Ursprungseinbeziehung rekonstruierbar.

*

Ursprungseinbeziehung und Kraftvorrat

Das Präkonzept, ein Körper, der sich bewegt, "habe" Kraft, steht in einem Zusammenhang mit dem globalen Denken. Es wird implizit der Vorgang des In-Bewegung-Setzens mitbedacht, bei dem 'etwas' (Kraft/Energie/Schwung: Wirkfähigkeit) auf den Körper übertragen und von ihm gespeichert wird.

In Aufgabe B1 des Tests DAM (siehe B.2.2.2) zeichneten 61% von 235 Schülern im Punkt A der Flugbahn des Balles einen (Kraft-) Pfeil in Richtung der Tangente. Das ist zunächst durch das Präkonzept P3-2 zu erklären, nach dem in Richtung der Bewegung eines Körpers immer eine Kraft wirkt (siehe B.3.3.2.3). Als Vorverständniselement allgemeinerer Art kann zur Erklärung des Verhaltens der Denkrahm D10 herangezogen werden. Ein Ausschnitt aus einer Nachbesprechung des Testitems dient als Beleg:

- Lehrer Konzentrieren wir uns auf Punkt A der Flugbahn. Welche Kraft wirkt an dieser Stelle auf den Körper?
- Iris Einmal die Vorwärtskraft und einmal die Erdanziehungskraft.
- S 1 Die Erdanziehungskraft ist immer da, und um den Ball vorwärts zu bewegen, muß auch eine Kraft nach rechts da sein.
- Lehrer Für die Gewichtskraft ist offensichtlich die Erde verantwortlich. Und woher kommt die andere Kraft?
- Frank Durch die Beschleunigung.
- Lehrer Also durch meine Hand?
- Frank Ja.
- S 2 Das ist irgendwie wie eine Feder, die beschleunigt.
(...)
- Kai Wenn du den Ball wegwirfst, übst du ja auch eine Kraft auf ihn aus. Und diese Kraft speichert der Ball in Form von Energie.

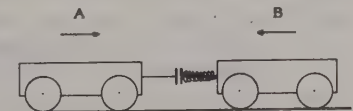
Obwohl die Aufgabe keinen Verweis auf Beginn oder Ursprung der Bewegung enthält (die Bahnkurve beginnt an einem willkürlich gewählten Punkt) und ihre Kenntnis für die Lösung ohne Belang ist, rekonstruieren Frank und Kai die Situation des In-Bewegung-Setzens. Gleichzeitig wird, wie von Viennot geschildert, eine Kraftvorrats-Vorstellung aktiviert.

*

Fallstudie: Kraftaustausch beim Stoß

Das dritte Beispiel, das in Form einer Fallstudie zum Schülerverhalten in einem Unterrichtsabschnitt über Kräfte beim Stoß dargelegt wird, macht einen Vorgriff auf Präkonzept-Studien zum Kraftverständnis (vgl. Punkt B.3.3.2.2). Für globales Denken ist das Beispiel bedeutsam, weil es zeigt, wie unterschiedlich die Sicht eines Vorgangs in verschiedenen Denkraumen erfolgen kann. Während der Lehrer auf die lokale Wechselwirkung beim Stoß abzielt, bilanzieren die Schüler 'Kräfte', die die Wagen "haben" und austauschen. Ihr Thema ist die "Kraftübertragung". Im globalen Denken findet die Bewegung der Wagen vor dem Stoß Beachtung.

Lehrer Ich wollte den Zusammenhang von Kraft und Impuls jetzt noch einmal an einem anderen Fall untersuchen - und zwar bei irgendeinem Stoßvorgang, wobei egal ist, ob er elastisch oder unelastisch ist. Wir lassen also wieder zwei Wagen auf einer Fahrbahn zusammenstoßen. Meinetwegen befestigen wir an einem Wagen wieder so eine Feder und am anderen einen Rammbock. (zeichnet) - So, und jetzt stoßen die zusammen - ganz egal, wie die sich vorher bewegt haben. Wie sieht es jetzt eigentlich mit den Kräften aus, die dabei ausgeübt werden?



Otfried Die jetzt also die beiden Wagen während des Versuchs aufeinander ausüben?

Lehrer Also, die sind jetzt meinetwegen hier zusammengefahren. Die Feder hat sich meinetwegen so ein bißchen eingedrückt. Wie sehen die Kräfteverhältnisse jetzt in diesem Moment aus?

Falk Also, ich würde das jetzt so sehen: In der Feder da wird einen Augenblick lang eine Kraft gespeichert. Die Feder wird ja erst einmal verformt. Also wird an der Feder etwas ausgeübt. Und dann gibt die Feder diese Kraft wieder ab.

Schon zu Beginn des Unterrichtsabschnitts deutet sich ein Verständigungskonflikt an. Der Lehrer betont, es solle sich um einen beliebigen Stoßvorgang handeln:

"Ganz egal, wie die sich vorher bewegt haben". In Otfrieds Nachfrage ist die Zeitbestimmung "während des Versuchs" als ein Hinweis auf globales Denken zu werten. Die Bewegungen vor und nach dem Stoß werden zum "Versuch" dazu gezählt. Dadurch rückt der Aspekt der "Kraftübertragung" in den Vordergrund. Falk verwendet "Kraft" als ein speicher- und übertragbares 'Etwas'. In den weiteren Aussagen von Rolf und Falk kommt dieser Aspekt deutlicher zum Ausdruck.

Lehrer Gut, das können wir meinetwegen so zusätzlich betrachten, daß hier eine Kraft nötig ist, um die Feder zu verformen. Interessieren soll uns aber hauptsächlich die Krafteinwirkung von Wagen A auf Wagen B und umgekehrt. Die sind ja wichtig für das Verhalten der beiden.

Rolf Die Kraft von dem einen Wagen wird auf den anderen Wagen übertragen, und zwar beidseitig. Die Kraft von Wagen A wird auf B übertragen und die Kraft von Wagen B auf Wagen A.

Lehrer Also, Wagen A übt auf Wagen B irgendeine Kraft aus. Die kann natürlich nur in diese Richtung wirken (deutet nach rechts). (...) Aber B übt natürlich auch eine Kraft auf A aus. Und wie groß ist die?

In seinen Aussagen versucht der Lehrer die Schülerantworten durch eine andere Wortwahl ("Kraftausübung" statt "Kraftübertragung") umzuinterpretieren. Die Schwierigkeit des Lehrers, den Aspekt der momentanen, lokalen Wechselwirkung der beiden Wagen als den "interessierenden" Punkt zur Diskussion zu stellen, ist jedoch keine Problem der Wortwahl, sondern der generellen Herangehensweise an die Analyse des Vorgangs. Die Schüler, die sich am Unterrichtsgespräch beteiligen, argumentieren im Rahmen des globalen Denkens. Falk greift in der nächsten Aussage wiederum die Idee der Kraftübertragung auf.

Falk Also, das ist genau die Kraft, die vorher bestanden hat. Wenn B vorher auch eine Geschwindigkeit hatte, dann fährt jetzt A mit dieser Geschwindigkeit in die Richtung, die vorher B gefahren hat.

Lehrer Du mußt jetzt aufpassen, worüber wir reden. Wir reden im Moment über Kräfte in einem bestimmten Moment des Stoßes - also nicht darüber, was hinterher ist. Wenn wir eine Momentaufnahme machen zu einem beliebigen Zeitpunkt des Stoßes - (...) Und dann beobachten wir, A drückt mit der Kraft F gegen B. Mit welcher Kraft drückt dann B gegen A?

Albert Ich würde sagen, das ist genau umgekehrt ... (weitere Antwort akustisch nicht zu verstehen)

Lehrer Ja, das ist ja nur eine Namensgebung. Aber wie groß ist die?

Albert Ich würde sagen, der mechanische Vorgang ist ohne Reibungswiderstände und die müßte demnach genauso groß sein.

Lehrer Ja, genauso groß, aber mit einem wichtigen Unterschied.

Oswald Warum denn genauso groß? Wenn die Kräfte vorher unterschiedlich waren, sind sie nicht genauso groß.

Oswald macht deutlich, daß er nicht über die Kräfte während des Stoßkontakts nachdenkt, sondern über 'Kräfte', die die Bewegungen der Wagen vor und nach dem Stoß kennzeichnen. Auch bei Albert kann eher das Fungieren einer Kraftvorrats-Vorstellung angenommen werden als ein Verständnis von Kraft als Wechselwirkungsstärke. Darauf verweist der von ihm zwar ausgeschlossene, aber doch für mögliche gehaltene 'Kraft'-Verlust durch Reibungswiderstände. Der Zusammenhang von Ursprungseinbeziehung mit dem Präkonzept, bewegte Körper hätten 'Kraft', zeigt sich in der Aussage Oswalds, die am Ende des zitierten Protokolls steht.

Lehrer Wir haben da offensichtlich noch ein Problem, mit dem Begriff 'Kraft' umzugehen. Was soll das sein - die Kraft, die A vorher gehabt hat? Die Karre bewegt sich einfach, sie fährt mit irgendeiner Geschwindigkeit die Fahrbahn entlang. Wo soll da irgendwo eine Kraft auftreten?

Oswald Sie muß ja irgendwo die Bewegung herbekommen, damit sie sich überhaupt bewegt.

B.3.2.3 Bereich 3: Schwerpunkte allgemeiner Interessen

Im Bereich 3 werden drei Schwerpunkte allgemeiner Interessen dargestellt. Die angeführten Vorverständniselemente beschreiben Verhaltensdispositionen, die sich in der besonderen Zuwendung von Schülern zu bestimmten übergeordneten Inhalts- oder Tätigkeitskategorien ausdrücken. Präferenzen für Einzelthemen der Mechanik gehören nicht zur Komponente I des thematischen Vorverständnisses. Nebenerkundungen in anderen Gebieten deuten an, daß die Geltung der allgemeinen Interessen über die Mechanik hinausreicht. Für die Diskussion der Vorverständniselemente werden unter anderem Daten aus Unterrichtsbegleitungen im Themenfeld Magnetismus herangezogen. Wir haben solche allgemeinen Interessen aufgegriffen, die für Lern- und Vermittlungsprozesse im Physikunterricht besonders bedeutsam sind.

B.3.2.3.1 Allgemeines Interesse 2: Interesse an Erkenntnisprodukten

AI2: Schüler interessieren sich für die Ergebnisse der Physik. Der Prozeß ihres Zustandekommens, ihre Herleitung und Begründung aus empirischer Erfahrung und theoretischer Spekulation, interessieren weitaus weniger.

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

AI2 besteht in der Fixierung auf die Produkte physikalischer Erkenntnisgewinnung - verstanden als Definitionen, Gesetze und Formeln sowie Anwendungsbeispiele. Demgegenüber findet die Entwicklung physikalischer Aussagen aus kreativ-spekulativen Ideen, empirischer Erfahrung und verfügbaren Theorien weit weniger Beachtung - ganz zu schweigen von entwicklungsgeschichtlichen Vorläufern heute gültiger Sätze und wissenschaftstheoretischen Aspekten des Theoriebildungsprozesses.

Das Element AI2 ist überwiegend aber nicht durchgängig Bestandteil der individuellen Vorverständnisse von Oberstufenschülern. Man trifft auch einen pointierten gegenteiligen Standpunkt an, nach dem gerade die entwicklungsgeschichtlichen Grundlagen des heutigen Erkenntnisstandes interessant und für das Verständnis von Physik förderlich sind. Im Verlauf der Diskussion von AI2 werden solche Beispiele geschildert. Wir haben die Gegenposition in Grundkursen eher angetroffen als in Leistungskursen und bei Mädchen häufiger als bei Jungen.

Die Phasen der Herleitung und Begründung von Begriffen und Sätzen aus Experimenten und Deduktionen haben einen zeitlich bedeutsamen Anteil am Physikunterricht in der Oberstufe. In den begleiteten Kursen waren die Unterrichtsanteile für Einführungen neuer Strukturen besonders umfangreich, weil der Diskussion schülereigener Ideen zu den behandelten Themen viel Raum gegeben wurde. Die Lehrer wollten die Einsicht fördern, daß über die reine Formelkenntnis hinaus (vgl. Denkrahen 8 "Formelfixierung") der Gehalt der Gesetze und die Bedeutung der darin auftretenden Größen, ihre Anwendungs- und Gültigkeitsbereiche sowie die Abgrenzung der physikalischen Begriffe von anderen (z.B. Alltags-) Konzeptualisierungen für den Erwerb physikalischer Kompetenz wichtig sind. Den Bemühungen war jedoch nach unserem Eindruck, der sich an Zitaten aus Unterrichtsprotokollen und Kurzinterviews erhärten läßt, nur begrenzeter Erfolg beschieden. Manche zeitaufwendige Diskussion über Begriffsbedeutungen und manche ausführliche theoretisch-experimentelle Herleitung eines Satzes ging an der Schülern vorbei, weil sie diese Phasen für verzichtbar hielten und sie auf das am Ende stehende Ergebnis (Merksatz, Gesetz) und dessen Anwendung

in Beispielen warteten. Ein Schüler drückte die Haltung so aus: "Wichtig ist, wie es ist und wie man es anwendet, nicht wie man dazu kommt".

Wenn die Ausbildung physikalischer Kompetenz allein durch Akkumulation von Ergebnissen möglich wäre, könnte man über die mangelnde Beachtung der Erarbeitungsphasen hinwegsehen. Physikalische Sätze können jedoch nicht wie Vokabeln gelernt werden, die man von der Tafel abschreibt. Zu ihrem Verständnis gehört das Nachdenken über die Bedeutung der darin auftretenden Begriffe. Besonders in der Mechanik besteht sonst die Gefahr, daß Schüler sich lediglich Formeln aneignen, ohne ihre Vorstellungen zu den darin auftretenden Größen, wie Kraft, Geschwindigkeit oder träge Masse, zu reflektieren und die physikalischen Konzepte von Alltagsvorstellungen abzugrenzen.

Offen gestaltete Unterrichtsabschnitte, in denen über die Interpretation einer Beobachtung kontrovers diskutiert wurde und in denen der Lehrer sich auf die Rolle eines Moderators beschränkte, ohne die Schüleraussagen schnell als richtig oder falsch zu bewerten, wurden von manchen Schülern als belastend oder als Zeitverschwendung angesehen. Der Lehrer, als Vertreter der Fachwissenschaft, sollte lieber gleich die richtige Lösung verkünden. Der passende Ort für Diskussionen sei der Deutsch- oder Geschichtsunterricht. In der Physik komme es nur auf das Ergebnis an, und das stehe ohnehin fest.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Einschätzung offener Unterrichtsphasen

Wir beginnen die Illustration des Vorverständniselements AII mit Aussagen von Schülern zur Unterrichtsform des SVU. Die Leistungskursschüler bearbeiteten über einen Zeitraum von mehreren Wochen eigenständig Fragestellungen aus dem Themenbereich Magnetismus. Im Verlaufe der Gruppenarbeitsphase wurden sie darüber befragt, wie sie die Form des selbstgeleiteten Lernens im Vergleich zum Frontalunterricht einschätzen.

- S 1 Von Zeit zu Zeit kann man so etwas machen. Man lernt aber mehr, wenn der Lehrer systematisch den Stoff darstellt. Man lernt dann auch Zusammenhänge. Bei eigenen Versuchen weiß man nicht, was rauskommt. Das kann auch mal falsch sein, und es besteht dann die Gefahr, daß man sich etwas Falsches merkt. Im Frontalunterricht kann man davon ausgehen, daß es einem wohl richtig erzählt wird.
- S 2 Am meisten lernt man, wenn der Lehrer sagt: "Das ist so und so - und damit basta".
- Frage: Habt ihr versucht, auch eigene Versuchsanordnungen zu überlegen, z.B. einmal die Kraft auf die Leiterschaukel im Hufeisenmagneten zu

bestimmen?

S 3 Nein. Warum soll ich mir Versuche selbst überlegen, die dann auch noch ungenau sein können, wenn es vorgefertigte Aufbauten gibt, die das genaue Ergebnis liefern.

Frage: Wollt ihr bei eurem Thema geschichtliche Aspekte, wie die Entdeckung der Induktion, berücksichtigen?

S 3 Ich habe keine Lust über Faraday in Büchern zu lesen. Das ist Gegenstand des Geschichtsunterrichts.

S 4 Es wäre besser gewesen, wir hätten einen Leitfaden für die Vorgehensweise gehabt. Dann hätten wir uns die ersten vier Stunden, wo jeder nur rumprobiert hat, ersparen können.

Frage: Interessiert ihr euch auch für die Entdeckung der Ablenkung von Elektronenstrahlen?

S 5 Warum soll man sich mit so alten Sachen beschäftigen? Hauptsache ist, ich weiß, wie es jetzt ist.

Von 16 in diesem Kurs befragten Schülern äußerte keiner ein Interesse an der Entdeckungsgeschichte eines Phänomens oder der Entwicklung des Wissens über Magnetismus. Nur ein Schüler hielt die Unterrichtsform des SVU für effektiver als den herkömmlichen Frontalunterricht.

S 6 Ich finde, was man selbst gemacht hat, behält man auch besser. Mir gefällt es gut, wenn man selbst überlegen kann, was man machen will.

Der Tenor der Antworten lautete, man könne zur Abwechslung von Zeit zu Zeit Unterrichtseinheiten in Form eines SVU einschieben. Positiv vermerkt wurde die ausgiebige Gelegenheit zum Experimentieren (vgl. A14). Auf Dauer sei jedoch der herkömmliche Frontalunterricht vorzuziehen, weil man dort mehr lerne. Das "Mehr" an Lernzuwachs bezog sich erkennbar auf die Zahl der behandelten Phänomene und Gesetze, nicht auf den Grad der Verarbeitung. Eine Reihe von Schülern äußerten das Bedenken, sie hätten während der SVU-Phase "zu wenig Stoff" durchgenommen.

*

In einem zweiten Leistungskurs, der parallel zum gleichen Themenbereich durchgeführt wurde, fielen die Stellungnahmen ähnlich aus. Es gab allerdings eine Schülerin, die das Thema "Entdeckung und Entwicklung des Magnetismus" bearbeitete. Sie erläuterte ihre Wahl folgendermaßen:

"Die meisten meiner Mitschüler interessieren sich nicht für Geschichte. Die interessieren sich für die praktischen Anwendungen. Mich interessiert nicht so sehr, wie man das heute anwendet, sondern mehr, wie es dazu gekommen ist - wie es entdeckt wurde."

Geschichtliche Aspekte der jeweiligen Themen wurden in Interviews von den

Schülern fast ausschließlich als personenbezogene Entdeckungsgeschichte aufgefaßt. An eine Ideengeschichte dachte bei der Frage nach einer möglichen Einbeziehung der Ursprünge und der Entwicklung der Theorie des Magnetismus niemand. Eine typische Antwort:

"Es wäre für mich nicht denkbar gewesen, ein geschichtliches Thema zu nehmen. Ich finde es nicht so wichtig, nochmal die ganzen Erfinder aufzuzählen. Da finde ich neuere Anwendungen schon wesentlich interessanter - was jetzt ist."

In einer zusammenfassenden Wertung der Unterrichtseinheiten schreiben die beiden durchführenden Kollegen:

Prozeßorientierung ... meint eine Zurückstellung von Ergebnissen (z.B. Formeln, Naturgesetzen, Begriffen) zugunsten des Prozesses ihrer Entwicklung, also z.B. von physikalischen Erkenntnismethoden, Genese von Begriffen und Geschichte der Physik. In diesem Sinne ist Prozeßorientierung keineswegs automatisch mit Schülerzentrierung verbunden. Ja, unsere UE zeigte eher, daß sich die beiden Forderungen teilweise widersprachen. Wenn Schüler ihre unmittelbaren Fragen und Interessen formulieren, zielen diese in der Regel darauf, zu wissen, "wie es ist". Fragen danach, "wie es gekommen ist", finden die meisten erst einmal überflüssig und langweilig. Exemplarisch wird daran deutlich, daß es uns (fast) nicht gelungen ist, eine Gruppe zu dem Thema "Geschichte des Magnetismus" arbeiten zu lassen, obschon wir viele Initiierungen in diese Richtung versucht haben. Darüberhinaus waren sämtliche Referate in beiden Unterrichtseinheiten extrem resultatorientiert. Schon die Herleitung einer Formel fanden die Schüler teilweise überflüssig. (Geßmann 1982, 81)

Die Erfahrung, daß Schüler in der Protokollierung und Referierung ihrer Arbeiten im SVU stark resultatorientiert sind und die Wiedergabe des Arbeitsprozesses für überflüssig halten, wurde auch in anderen Kursen gemacht. Es bedarf ständiger Anstöße, wenn Schüler dazu gebracht werden sollen, Vorüberlegungen, Zwischenergebnisse, verworfene Interpretationsansätze usw. festzuhalten. Bittet man Schüler während eines SVUs, über den Stand ihrer Arbeiten zu berichten, so ist eine typische Antwort: "Wir können noch nichts sagen, wir haben noch keine richtigen Ergebnisse."

*

An den letzten Satz des oben zitierten Berichts über die Unterrichtseinheiten zum Magnetismus läßt sich eine Schüleräußerung anschließen, die in einem anderen Kurs fiel, nachdem über ausführliche Versuchsreihen zur Zentripetalkraft und der detaillierten Auswertung der Meßreihen das Gesetz $F = m \cdot r \cdot \omega^2$ erarbeitet worden war und an der Tafel stand.

S 1 Das hätten wir auch einfacher haben können, wenn Sie uns die Formel

gleich gesagt hätten.

Ein anderer Schüler sah in der langen Erarbeitungsphase dagegen einen Sinn:

S 2 Jetzt weiß man aber, woher es kommt.

Lehrer Wir haben jetzt nachvollzogen, wie lange das dauern kann.

S 2 Das dürfte in Wirklichkeit noch viel länger gedauert haben.

*

Kehren wir zurück zur Einschätzung offener Unterrichtsphasen durch Schüler. In einem Grundkurs Mechanik wurde Kritik an einem Unterrichtsabschnitt laut, in dem, angeregt durch Texte aus Galileis 'Discorsi', kontrovers diskutiert wurde (z.B. zur Frage der Beweisbarkeit der Erddrehung) und in dem eine Zeitlang offen blieb, ob einzelne Schüleraussagen richtig oder falsch waren. Sascha, der die Kritik äußerte (siehe unten), empfand diese Art der Gestaltung des Physikunterrichts nicht als Gelegenheit, um eigene Gedanken einbringen zu können und aus der Rolle des Rezipienten herauszutreten. Er sah die Situation eher als belastend an, weil die richtige Lösung vom Lehrer nicht sofort mitgeteilt wurde. Die Kritik entzündete sich an der Absicht des Lehrers, einen weiteren Text als Diskussionsgrundlage zu verteilen.

Sascha Soll das wieder so laufen, wie in den letzten Stunden?

Lehrer Ja. Wieso?

Sascha Nervig.

Lehrer Kannst du das mal näher spezifizieren? Ich meine, wenn euch das nicht gefällt, dann sagt das ruhig.

Sascha Wenn das wieder so ist, daß am Anfang erstmal so eine Behauptung in den Raum gestellt wird - dann wird nicht gesagt, ob die richtig oder falsch ist, sondern immer nur "Hm", "Hm" gesagt -

Schüler (lachen; einige zustimmende Zurufe)

Sascha Da wird nicht gesagt, ob das richtig oder falsch ist und man weiß nicht, woran man ist.

Der Lehrer ging ausführlich auf die Kritik ein. Er begründete, warum Physik mehr ist als ein Paket von Fakten und Formeln, und verwies auf die Genese der mechanischen Begriffe, in der manche Argumente, die von den Schülern eingebracht worden wären, auch in der Wissenschaft eine Rolle gespielt hätten, was z.B. in Galileis Schriften deutlich werde. (Der zu verteilende Text behandelte den Fall eines Steines von der Mastspitze eines fahrenden Schiffes.)

Es ist notwendig, sich mit der dominierenden Interessenausrichtung auf die Produkte der Physik argumentativ auseinanderzusetzen. Das damit verbundene Bild

von der Physik als einem statischen Theoriengebäude (vgl. Denkrahen 4; B.3.2.1.4) ist mit Bezug auf die physikalische Ideengeschichte zu problematisieren. Es gehört zu den Aufgaben des Unterrichts, den Schülern ein zutreffendes Bild vom Wesen der Wissenschaft Physik nahezubringen.

*

Beispiele, in denen AI2 nicht fungiert

Es gibt eine Gruppe von Schülern, in deren Denkweise die Fixierung auf Ergebnisse/Fakten/Formeln nicht fungiert. Man findet diese Schüler eher in Grund- als in Leistungskursen und unter Mädchen, relativ gesehen, häufiger als bei Jungen. Wir geben damit einen Eindruck aus unseren Unterrichtsbegleitungen wieder, ohne ihn statistisch absichern zu können.

Die Beispiele für ein Interesse an der eigenständigen Erarbeitung von Sachverhalten und am Weg des Zustandekommens von Erkenntnissen stammen bezeichnenderweise aus einem Grundkurs. In einer Abschlußbesprechung am Ende des Halbjahres 11/1 begrüßten mehrere Schüler ausdrücklich die im Unterricht an verschiedenen Stellen vorgenommene Einbeziehung der Genese mechanischer Begriffe. Ein Schüler sagte: "Ich würde überhaupt immer von den geschichtlichen Vorstufen ausgehen. Dann versteht man erst richtig, wie es zu den Gesetzen kam."

Im gleichen Kurs wurde die Unterrichtsform des SVU sehr viel positiver bewertet als in den eingangs herangezogenen Leistungskursen. Auf die Frage, was an der zweiwöchigen SVU-Phase zum Rahmenthema "Stoßvorgänge" besonders gefallen habe, kamen unter anderem folgende schriftliche Antworten:

- "Das alleinige Vorbereiten und Durchführen habe ich als sehr positiv empfunden. Es hat mir gefallen, daß der Versuch (soweit wie möglich) selbst ausgedacht werden konnte."
- "Daß man etwas selber machen konnte und nicht alles vorgesetzt bekommen hat."
- "1. Experimentieren, 2. eigene Fragestellungen aufzustellen, 3. Versuchsaufbau überlegen, 4. nicht genau wissen, was rauskommt."
- "Die Möglichkeit, eigene Fragestellungen zu beweisen oder, je nach dem, zu widerlegen."

Ein Grund für die skeptischere Haltung von Leistungskursschülern gegenüber offenen Unterrichtsabschnitten liegt wohl zu einem Teil darin begründet, daß sie - auch im Hinblick auf die Abiturprüfung - befürchten, sie könnten dadurch "Stoff" verpassen, der normalerweise drangewesen wäre. Hier wird zugunsten der Stoffmenge (Quantität der Fakten und Formeln) die Vertiefung der behandel-

ten Themen hintangestellt. Grundkursschüler verspüren keinen vergleichbaren vermeintlichen Stoffdruck.

*

Unbeliebtheit ideengeschichtlicher und wissenschaftstheoretischer Aspekte

Das Interesse von Schülern an der unterrichtlichen Behandlung der Geschichte physikalischer Theorien und an wissenschaftstheoretischen Aspekten des Zustandekommens physikalischer Erkenntnisse wurde im differentiellen Interessentest ITM erhoben (vgl. B.2.2.1). 10 von 71 Items der Liste möglicher Tätigkeiten in einem Mechanikkurs der Sekundarstufe II bezogen sich auf die obengenannten Bereiche. Einige Beispiele:

- 118) Einen Auszug aus einer Originalarbeit von Isaac Newton lesen.
- 137) Die Bedeutung der Mechanik für die Entwicklung anderer physikalischer Theorien erläutert bekommen.
- 147) Die Ursprünge der Theorie der Mechanik kennenlernen.
- 167) Überlegen, wann physikalische Gesetze als bewiesen gelten.

Die Faktorenanalyse ergab einen eindeutig als "Wissenschaftstheorie/Wissenschaftsgeschichte" interpretierbaren Faktor, der 9 von 10 Items aus diesem Feld enthält. Die Items unterlagen demnach einer gemeinsamen Antworttendenz. Der Faktorenbeliebtheitsindex BI (siehe S. 109) zeigt den Faktor bei Jungen und Mädchen auf den unteren Rängen 6, bzw. 5 (bei insgesamt 6 Faktoren). Die mittlere Einschätzung $\overline{BI}$ der auf den Faktor signifikant ladenden Items liegt bei 2,8 (Mädchen), bzw. 3,0 (Jungen).

Gemessen am Index $\overline{BI}^*$ liegt der Faktor bei Mädchen auf dem dritten Rang ($\overline{BI}^* = 1,18$) und damit z.B. weit vor dem Faktor "(Fahrzeug-) Technik" ($\overline{BI}^* = 1,33$). Bei Jungen rangiert der Faktor "Wissenschaftstheorie/Wissenschaftsgeschichte" auch gemessen an $\overline{BI}^*$ auf Rang 5 ($\overline{BI}^* = 1,32$). Die Mädchen bewerteten einige der hoch auf den Faktor ladenden Items (die damit stark bei $\overline{BI}^*$ ins Gewicht fallen) deutlich positiver als die Jungen. Beispiele:

- 14) Diskutieren, unter welchen Aspekten die Physik die Natur betrachtet.
(BI_4 bei Mädchen: 2,58; bei Jungen: 3,15)
- 110) Einen Text zum Zusammenhang zwischen Gesellschaftsentwicklung und Entwicklung der physikalischen Theorie besprechen.
(BI_{10} bei Mädchen: 3,23; bei Jungen: 3,73)

In beiden Fällen unterscheiden sich die Beliebtheitsindizes signifikant (bei Zugrundelegung von 1% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Die positivere Einschätzung durch Mädchen zeigt sich besonders bei Items mit

eher wissenschaftsphilosophischen als -geschichtlichen Inhalten. Jungen bewerteten selbst die sonst so beliebte Behandlungsform "Film angucken zu ..." im Zusammenhang mit dem Inhalt "Beziehung zwischen Gesellschaftsentwicklung und Entwicklung der Physik" (Item 22) nur mit $BI_{22} = 3,09$ (Mädchen: 2,47).

Wir können aus den Ergebnissen des differentiellen Interessentests festhalten, daß Themen aus dem Bereich Ideengeschichte/Wissenschaftstheorie auf ein vergleichsweise geringes Interesse stoßen. Bei Mädchen ist der Beliebtheitsgrad der dazu zählenden Items durchweg etwas höher als bei Jungen.

B.3.2.3.2 Allgemeines Interesse 3: Interesse an technischen Fragestellungen

AI3: Schüler interessieren sich mehr für praktisch-technische Fragestellungen als für die begrifflich-prinzipielle Strukturierung von Phänomenen durch Einordnung in theoretische Erklärungsrahmen.

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Eine Einbeziehung von Alltagsphänomenen in den Physikunterricht erweckt bei Schülern die Erwartung, daß deren praktisch-technische Aspekte behandelt werden, wie z.B. die Funktionsweise von Geräten. An der Frage "Wodurch kommt die Bewegung eines Autos zustande?" interessieren die Themen Motor, Getriebe, Bremsen usw. Die Betrachtung eines Anfahrvorgangs unter den Aspekten der Angriffspunkte von Antriebs- und Reibungskräften, der Wechselwirkung Straße - Auto, der Impulserhaltung oder ähnlichen Gesichtspunkten, die im Rahmen der Newtonschen Mechanik bedeutsam sind, stehen ihrem Fragehorizont fern. Sie werden oft nur als gedankliche Spielerei ohne großen Wert akzeptiert. Diese Reserviertheit behindert den physikspezifischen Zugang zu praktisch relevanten Aussagen, der über eine theoriegeleitete Betrachtung des Sachverhalts in einer verallgemeinerten Form führt. Die Interessenausrichtung von Schülern auf praktisch-technische Themen wird dann problematisch, wenn die Begriffe, Prinzipien und Sätze der Physik dafür als verzichtbar erachtet werden oder Physik weitgehend mit Technik gleichgesetzt wird.

Die Herstellung von Zusammenhängen zwischen den Strukturierungshilfen, die die Theorie bereitstellt, und konkreten Folgerungen, die es ermöglichen, lebensweltlich bekannte Vorgänge unter physikalischen Aspekten neu zu sehen, ist eine Aufgabe, die im Physikunterricht der Sekundarstufe II im Zuge der Wissenschafts- und damit Theorieorientierung ein wenig aus dem Blickfeld geraten ist. Hier liegt ein lohnendes Arbeitsgebiet für die Physikdidaktik. Ein gelungenes Beispiel für die Integration von Theorie und Praxis sind die von Westphal erarbeiteten Unterrichtsmaterialien für einen Kurs über Mechanik und Verkehrssicherheit (Westphal 1981).

Bei AI3 ist eine geschlechtsspezifische Differenzierung vorzunehmen. Das Interesse an praktisch-technischen Fragestellungen, bzw. die Disposition, sich - dort wo Anknüpfungspunkte gegeben sind - solchen Aspekten behandelten Themen zuzuwenden, ist bei Jungen deutlich stärker ausgeprägt als bei Mädchen.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Kritische Einschätzung des praktischen Nutzens physikalischer Aussagen

Viele Vorgänge gelten bei Schülern als geklärt, wenn es für sie technische Erklärungen gibt. Daran angeschlossene physikalische Betrachtungen erscheinen künstlich oder aufgesetzt. Das Interesse gilt eher einer genaueren technischen Analyse.

Auf die Lehrerfrage, wodurch es komme, daß ein Auto in Bewegung gesetzt werde (die Frage wurde bei einer Einführungsstunde zum Kraftbegriff gestellt), kamen als erste Stichworte von Schülern "Zündspule" und "Motor/Getriebe", schließlich auch "Kraft".

Lehrer Also braucht man eine Kraft. Und wie ist das, wenn der Wagen weiterfährt? Wie kommt es dazu, daß ein Wagen immer weiterfährt?

Lorenz Da sitzt ein kleiner Hamster drin.

In der Antwort von Lorenz steckt mehr als ein Witz. Man kann sie interpretieren als: "So eine blöde Frage. Ist doch klar, warum ein Auto fährt."

Aus der Besprechung des Anhalteweges eines PKWs als Beispiel für eine beschleunigte Bewegung stammt das folgende Zitat:

Lehrer Was muß man alles berücksichtigen, wenn ein Auto zum Stehen kommen soll. Sagen wir, daß auf der Autobahn ein Unfall ist, und man will da nicht gerne draufbrettern.

Peter Das rechnet sich doch kein Mensch im Auto durch.

Lehrer Das ist schon richtig, daß man sich nicht erst auf den Randstreifen stellt und das ausrechnet. Aber was muß man z.B. an Größen kennen, um den Abstand richtig einzuordnen?

Lorenz Ich würde sagen Geschwindigkeit, Abstand und Reibung der Reifen. Beispielsweise, wenn ich schlechte Reifen habe, dann rutsche ich ein Stück weiter. Und man soll mit Intervall bremsen.

Peter bezweifelt den praktischen Nutzen einer kinematischen Betrachtung der Situation. Wir interpretieren seine Äußerung folgendermaßen: "Man kann das vielleicht berechnen, aber in der konkreten Situation muß man sich doch auf seinen Instinkt verlassen." Lorenz widmet sich in seiner Antwort besonders den praktisch relevanten Aspekten der Reifenbeschaffenheit und der Art der Bremsung.

In beiden Unterrichtsbeispielen wurden die ersten, spontanen Einfälle zitiert. Sie sind für das Schülervorverständnis besonders aufschlußreich, weil die Schüler nicht aus bereits erfolgten Rückmeldungen des Lehrers schließen können, worauf dieser hinauswill.

Dem Einführungsbeispiel des Bremsvorgangs eines PKWs schloß sich eine ausführliche kinematische Behandlung von verzögerten Bewegungen an - unter reger Beteiligung der Schüler. Aus AI3 als Bestandteil individueller Vorverständnisse folgt nicht, daß Schüler sich nur bei technischen Themen aktiv am Unterricht beteiligen. Der Übergang vom einem konkreten Beispiel zu einer verallgemeinerten Aufbereitung und die Heranziehung der verfügbaren Theorieelemente wird (und wurde im betrachteten Fall) jedoch durch den Lehrer initiiert und gesteuert. Das Fungieren von AI3 hat zur Folge, daß die Schüler einen solchen Wechsel der Betrachtungsweise, bzw. der Intention nicht aus eigenem Antrieb vollziehen.

Im Unterricht wurden die Reifen- und Straßenbeschaffenheit sowie der Zustand der Bremsen durch die Größe Verzögerung ersetzt; an die Stelle der Sichtverhältnisse, Müdigkeit usw. trat die Reaktionszeit. Diese Transformation des Problems auf theoretisch zur Verfügung stehende Strukturen erfolgte gemäß dem physikspezifischen Zugriff auf Erfahrung. Es ist jedoch bedenklich, daß während der rund 60-minütigen Phase des Aufstellens und Lösens der Bewegungsgleichung die ursprünglichen, konkreten Bedingungsfaktoren in Vergessenheit gerieten und daß die Rücktransformation der physikalischen Lösung auf praktisch relevante Aussagen über Sicherheitsabstand und Anhaltewege von PKWs in rund drei Minuten als Anhang abgehandelt wurde. Dieses Schicksal widerfährt vielen Beispielen, die "zur Motivation" der Schüler beim Einstieg in neue Themen an den Anfang der Stunde gestellt werden. Es steht dem Interesse der Schüler an praktisch-technischen Gesichtspunkten entgegen und fördert den Eindruck, daß physikalische Betrachtungen intellektuelle Übungen ohne große tatsächliche Bedeutung seien.

*

Disposition zum Aufgreifen technischer Aspekte

Eine Tendenz zu technischen Überlegungen zeigte sich bei den Bearbeitungen von Aufgabe B5 des Tests DAM (siehe B.2.2.2). Es sollte der Fall diskutiert werden, daß ein PKW beim Durchfahren einer Kurve von der Fahrbahn abkommt. Obwohl das Item von Aufgaben umgeben war, die erkennbar physikalische Kompetenz testeten, beschrieb ein Drittel der Schüler das Phänomen überwiegend oder ausschließlich unter praktisch-technischen Gesichtspunkten. Zwei Beispiele:

- "Straßenglätte durch Regen oder Eis, zu schnelles Durchfahren der Kurve, Reaktion des Fahrers zu langsam."

- "Zu hohe Geschwindigkeit, Fahrer hat einen Fehler gemacht (durch Alkohol, Übermüdung usw.), Lenkung nicht in Ordnung, Wetter und Straßenverhältnisse ungünstig, Reifen geplatzt, Bremsen defekt."

Mögliche Gründe für diesen Antworttyp sind:

- keine physikalische Antwort gewußt
- das Problem nicht für physikalisch erklärungsbedürftig gehalten
- nicht an eine physikalische Argumentation gedacht.

Im letzten Punkt dürfte überwiegend die Erklärung zu suchen sein. Als Folge des allgemeinen Interesses AI3 kamen die Schüler zunächst auf mögliche praktisch-technische Ursachen des Unfalls, die in einer lebensweltlichen Behandlung des Vorgangs (denken wir an einen Zeitungsbericht) eine größere Rolle spielen würden als eine Beschreibung im Rahmen der physikalischen Theorie.

Rund 40% der Schüler (N = 254) beantworteten die Aufgabe aus einer physikalischen Betrachtungsweise. Leistungskursschüler tendierten stärker dazu als Grundkursschüler (47% zu 36%). Die verwendeten Begriffe waren Trägheit, Beharrungsvermögen des Autos, Fliehkraft, Haftreibung/Reibungskraft. Die Richtigkeit der Argumentationen wurde nicht gesondert erfaßt.

Neben gemischt physikalisch-technischen Antworten (17%) gab es noch 7% Scherzantworten (z.B. "Brille vergessen", "Schwiegermutter neben der Fahrbahn gesehen"), deren Gehalt wir so interpretieren: "Was soll so eine komische Aufgabe in einem Physiktest?" Die Aufgabenstellung wurde von diesen Schülern nicht für physikalisch erklärungsbedürftig oder -fähig erachtet.

*

In drei der begleiteten Kurse wurde beim waagerechten Wurf das beliebte Beispiel besprochen, bei dem ein Jäger von einem Hochsitz aus auf einen Affen anlegt, der in gleicher Höhe auf einem entfernten Baum sitzt. Der Affe läßt sich im selben Moment fallen, in dem er das Mündungsfeuer des Gewehrsschusses sieht. Die Frage lautet: Ist der Affe gerettet oder wäre es schlauer gewesen, sitzen zu bleiben?

Auf das Beispiel kann das Unabhängigkeitsprinzip nur dann in einfacher Weise angewendet werden, wenn eine Reihe von Abstraktionen mitgedacht werden, die es für eine Behandlung als waagerechter Wurf präparieren:

- der Schuß und der Absprung des Affen erfolgen absolut gleichzeitig (Vernachlässigung der Reaktionszeit),
- der Gewehrlauf liegt genau waagerecht (Vernachlässigung der Visiereinrichtung),

- Kugel und Affenkopf sind geometrische Punkte (Vernachlässigung des Körperausdehnung).

Lebensweltlich ist der Sachverhalt klar: Erfahrene Jäger treffen Affen, die auf Bäumen sitzen. Die Zieleinrichtungen des Gewehrs sind entsprechend konstruiert, wobei man davon ausgeht, daß der Affe sich im Moment des Abdrückens nicht fallen läßt.

Schüler, die das Affen-Beispiel von sich aus als einen waagerechten Wurf behandeln, ohne zu den obigen Punkten nachzufragen, vollziehen eine beachtliche Abstraktionsleistung. Wir zitieren Aussagen aus verschiedenen Kursen:

- "Der müßte getroffen werden, weil die Kugel ja auch runterfällt."
- "Logisch, daß der getroffen wird. Die Kugel fällt doch mit derselben Geschwindigkeit wie der Affe. Die Fallgeschwindigkeit hängt ja nur von der Entfernung ab und nicht vom Gewicht. Allerdings legt der Jäger ja nicht waagerecht an, sondern ein bißchen nach oben."
- "Wenn der sich nicht abstößt - Der Affe und die Kugel sind gleich schnell, das heißt, beide fallen gleich schnell runter."

Diese spontanen Antworten können als Gegenbeispiele zum Fungieren von AI3 gelten.

In zwei der drei Kurse, aus denen Protokolle zur Affen-Aufgabe vorliegen, verlief die Diskussion jedoch überwiegend in anderen Bahnen. Im ersten Kurs wurde das Problem überhaupt nicht als physikalisch behandelbar ernstgenommen. Hier ist anzumerken, daß über eine einfache Betrachtung als waagerechter Wurf hinaus die technischen Aspekte mit physikalischen Mitteln analysiert werden können, z.B. die entfernungsabhängige Justierung der Visiereinrichtung (schiefer Wurf). Bis zu diesem Punkte drang der Unterricht jedoch nicht vor, weil andere Fragen für die Schüler im Vordergrund standen. Diskutiert wurde über die Reichweite von Gewehren, die Treffsicherheit, die Einstellung von Kimme und Korn, die Verwendung von Zielfernrohren, Geschößgeschwindigkeiten usw. Die Anregung des Lehrers, die Justierung, bzw. den Anhaltewinkel in einen Zusammenhang mit physikalischen Überlegungen zum Wurf zu stellen, wurde nicht aufgegriffen. Nur ein Schüler versuchte die Bewegungsgleichungen heranzuziehen. Gegen die vom Lehrer vorgeschlagene Idealisierung des Vorgangs nach den genannten Kriterien wurden starke praktische Einwände erhoben. Der Lehrer brach die Diskussion schließlich ab und trug die physikalische Betrachtung selbst vor.

Auch im zweiten Kurs konzentrierte sich das Unterrichtsgespräch schnell auf die Fragen der Zielfernrohrjustierung, Kugelgeschwindigkeit und maximalen

Schußweite. Daraus einige Einzelzitate:

Thomas Schießt der mit Schrot oder mit Dum-Dum-Munition?

Rolf Zielt der Jäger auf den Kopf?

Bernd Wie weit ist das Ziel entfernt? - Wie weit schießt so eine Kugel?

Conrad Wie schnell ist so eine Kugel?

Olaf Ich will nochmal eines sagen: Ein Gewehr - die Zieleinrichtung eines Gewehrs ist doch immer auf den Punkt eingestellt, den man auch anzielt. Da müßte der den Affen doch eigentlich nicht treffen, wenn der sich fallen läßt.

Lisa Das ist wie beim Pfeil- und Bogenschießen. Wenn man ein Ziel in weiter Entfernung hat, dann schießt man erstmal ein bißchen nach oben.

Manche Schüler erkannten erst spät, daß ein Zusammenhang zwischen dem Affen-Beispiel und dem unmittelbar vorher behandelten Abschuß einer Stahlkugel mittels eines Feder-Schußapparats hergestellt werden konnte.

Es ist naheliegend und vollauf berechtigt, beim vorliegenden Beispiel praktisch-technische Gesichtspunkte einzubringen. Probleme ergeben sich aus dem Vorverständniselement A13 erst dann, wenn die Schüler sich nicht zumindest versuchsweise auf eine idealisierte Betrachtung als waagerechter Wurf einlassen und versuchen, die vorher erarbeiteten Strukturierungshilfen auf den neuen Fall anzuwenden. Zunächst ergäbe sich, daß der fallende Affe getroffen und der sitzende gerettet wird. In fortgeschrittenen Stadien der physikalischen Analyse ließen sich einige technisch interessante Details, wie die Zielfernrohrjustierung, aufklären. Setzen die Schüler dagegen a priori voraus, daß das Gewehr seinem Zweck entsprechend so gebaut ist, daß es den sitzenden Affen trifft und gilt ihr Interesse mehr den technischen Ausführungen von Visiereinrichtungen, kann sich ein physikalisches Prinzipverständnis des Vorgangs nicht entwickeln.

*

Technische Fragestellungen in SVUs

Der folgende Beleg stützt sich auf die Auswertung von SVUs im Bereich Magnetismus (Nebenerhebung in zwei Leistungskursen der zwölften Klasse). Als Initiierung und Einstieg in die Themenfindungsphase wurde die Anziehung/Abstoßung zweier stromdurchflossener paralleler Leiter in einem Demonstrationsexperiment gezeigt. Dadurch sollten Anstöße für mögliche Untersuchungen gegeben werden. Die Schüler nahmen die Impulse jedoch nicht auf. Die Kurslehrerin schildert ihre Eindrücke:

Überraschend für mich war die überwiegende Neigung zu praxis- und

anwendungsbezogenen Inhalten. Obwohl kein Schüler in der Lage war, die im Demonstrationsexperiment gezeigten Phänomene zu erklären, konnte dies keinen dazu ermuntern, sich mit diesen Sachverhalten - Feldbegriff, Abstandsgesetz, Kraftwirkung - auseinanderzusetzen. Entweder wurde es als zu simpel abgewertet, da man so etwas schon in der Mittelstufe untersucht, oder die Schüler wollten gezielt wegkommen von den Schulsystematiken, bei denen sie oft keinen Bezug zur Wirklichkeit entdecken können.
(Geßmann 1982, 51f)

Die ersten Ideen für Themenstellungen hatten in beiden Kursen fast ausschließlich technische Geräte zum Gegenstand: Motor, Sender, Tonbandgerät/Magnetaufzeichnung, Computerspeicher. Einige Gruppen ließen sich zu begrifflich-systematischen Fragestellungen umstimmen. In einer Befragung am Ende des SVU gaben die Schüler an, welches der Referate, die von den Gruppen zu den einzelnen Themen gehalten worden waren, sie für das interessanteste hielten. Im ersten Kurs hatten zwei der drei beliebtesten Referate einen eindeutig technischen Einschlag. An erster Stelle lagen die Themen 'Elektromotor' und 'Ablenkung von Elektronenstrahlen in der Braunschen Röhre' mit jeweils 4 Stimmen). Es folgte die 'Funktionsweise der Tonbandaufzeichnung', das 3,5 Stimmen erhielt. Die übrigen Themen (Halleffekt, magnetische Induktion, Lorenz-Kraft, e/m-Bestimmung) erhielten 0 bis 1,5 Stimmen.

Im zweiten Kurs rangierten die Themen mit Alltags- oder Technikbezug ebenfalls vor den begrifflich-systematischen. Zum beliebtesten Referat wurde 'Sonnenflecken und Polarlicht' gewählt. Es folgten 'Neue Anwendungen' (Magnetschwebbahn, MHD-Generator) und 'Tonaufzeichnung'. Die Gruppe 'Sonnenflecken und Polarlicht' überzeugte durch schöne Dias und eine anschauliche Beschreibung der Phänomene. Die eigentliche physikalische Erklärung der Phänomene blieb jedoch offen. Es gelang den Vortragenden z.B. nicht, den Zusammenhang zwischen der vorher behandelten Lorenz-Kraft und den von ihnen dargestellten Spiralbahnen der Sonnenwindpartikel herzustellen. Trotzdem wurde das Referat mit Abstand zum besten gewählt.

Aus SVUs lassen sich auch Gegenbelege zum postulierten Vorverständniselement AI3 zitieren. Unter den eigenständig gewählten und mit Engagement verfolgten Fragestellungen aus der Mechanik finden sich auf Begrifflichkeit und Systematik abzielende Themen wie:

- 'Energieumwandlung und Energieerhaltung beim Fadenpendel'
- 'Kraftübertragung beim Stoß'
- 'Umwandlung von Bewegungskraft/-energie in Federkraft/-energie'
- 'Untersuchungen über Gesetzmäßigkeiten der Fliehkraft'

Geschlechtsspezifische Differenzierung

Ergebnisse des differentiellen Interessentests ITM (siehe B.2.2.1) zeigen, daß das Interesse an technischen Fragestellungen geschlechtsspezifisch ausgeprägt ist. Die größten Interessenunterschiede zwischen Mädchen und Jungen ergaben sich - sowohl bei der Bewertung einzelner Items als auch bei der Faktorenbeliebtheit - in den Themenbereichen 'Naturphänomene' und '(Fahrzeug-) Technik'.

Die Einschätzung der Items erfolgte auf einer 5-stufigen Skala von "das würde ich besonders gerne tun" (1) bis "dazu hätte ich überhaupt keine Lust" (5). Daraus wurden zu jedem Item 'x' mittlere Beliebtheitsindizes $\overline{BI}_x$ berechnet. Hier einige Ergebnisse:

Nr.	Item-Text	Mädchen BI	Jungen BI
I6)	Die Leistungsdaten eines Automotors berechnen.	3,72	2,58
I19)	Technische Gegenstände untersuchen.	3,04	2,35
I26)	Die Entstehung der Jahreszeiten erläutert bekommen.	2,03	3,05
I59)	Die Funktionsweise eines Fliehkraftreglers herausfinden.	3,27	2,52

Alle Unterschiede sind signifikant auf dem 1%-Niveau.

Was sich bei den Item-Ergebnissen andeutet, setzt sich bei den Beliebtheitsindizes der Faktoren fort: Nach beiden Maßzahlen $\overline{BI}$ und $\overline{BI}^*$ (siehe dazu S. 109) liegt bei den Mädchen der Faktor 'Naturphänomene' (z.B. Ebbe-Flut, Jahreszeiten) an erster Stelle, bei Jungen dagegen an vorletzter, bzw. letzter. Umgekehrt stehen bei Jungen neben dem Faktor '(selber) experimentieren' die Faktoren 'Raumfahrt/Weltraum' (z.B. Satelliten-Umlaufbahn, Raketenmotor, Planetenbewegung) und '(Fahrzeug-) Technik' vorne (z.B. Leistungsdaten eines Automotors, Mofagetriebe, Kraft auf Formel-1-Piloten). Der Faktor '(Fahrzeug-) Technik' bekam von Mädchen schlechte Noten. Einen Überblick über die vollständigen Ergebnisse gibt die nachstehende Tabelle.

<u>Mädchen</u>		<u>Jungen</u>	
Rangordnung nach dem Index $\overline{BI}$:		Rangordnung nach dem Index $\overline{BI}$:	
1. Naturphänomene	$\overline{BI} = 2,53$	1. (selber) experimentieren	$\overline{BI} = 2,41$
2. (selber) experimentieren	$\overline{BI} = 2,71$	2. Raumfahrt/Weltraum	$\overline{BI} = 2,49$
3. Raumfahrt/Weltraum	$\overline{BI} = 2,77$	3. sportliche Leistungen analysieren	$\overline{BI} = 2,60$
4. sportliche Leistungen analysieren	$\overline{BI} = 2,77$	4. (Fahrzeug-) Technik	$\overline{BI} = 2,65$
5. Wissenschaftstheorie/-geschichte	$\overline{BI} = 2,82$	5. Naturphänomene	$\overline{BI} = 2,95$
6. (Fahrzeug-) Technik	$\overline{BI} = 3,13$	6. Wissenschaftstheorie/-geschichte	$\overline{BI} = 3,04$
Rangordnung nach dem Index $\overline{BI}^*$:		Rangordnung nach dem Index $\overline{BI}^*$:	
1. Naturphänomene	$\overline{BI}^* = 1,16$	1. Raumfahrt/Weltraum	$\overline{BI}^* = 1,04$
2. Raumfahrt/Weltraum	$\overline{BI}^* = 1,17$	2. (selber) experimentieren	$\overline{BI}^* = 1,05$
3. (selber) experimentieren	$\overline{BI}^* = 1,18$	3. (Fahrzeug-) Technik	$\overline{BI}^* = 1,09$
4. Wissenschaftstheorie/-geschichte	$\overline{BI}^* = 1,18$	4. sportliche Leistungen analysieren	$\overline{BI}^* = 1,29$
5. (Fahrzeug-) Technik	$\overline{BI}^* = 1,33$	5. Wissenschaftstheorie/-geschichte	$\overline{BI}^* = 1,32$
6. sportliche Leistungen analysieren	$\overline{BI}^* = 1,35$	6. Naturphänomene	$\overline{BI}^* = 1,40$

Betrachtet man die Bereiche 'Raumfahrt/Weltraum' und '(Fahrzeug-) Technik' zusammen, so zeigt sich, daß solche Themen im Vordergrund des Interesses von Jungen stehen, die sich mit technischen Anwendungen befassen. Mädchen dagegen bevorzugen Themen aus dem Bereich der natürlichen Umwelt. Das ebenfalls recht große Interesse von Mädchen am Faktor 'Raumfahrt/Weltraum' kann aus dessen teilweiser Überdeckung mit dem Faktor 'Naturphänomene' erklärt werden (Planetenbahnen, Schwerelosigkeit). Raumfahrttechnik war bei Mädchen nicht beliebt. Das Item I45 "Einen Zeitschriftenartikel über die Arbeitsweise eines Raketenmotors lesen" erzielte bei Jungen eine mittlere Interessenbewertung von $BI_{45} = 2,32$, bei Mädchen nur eine von 3,47.

Absolut gesehen, rangiert bei den Mädchen das Item I3 "Phänomene, die in der Natur vorkommen, untersuchen" mit weitem Abstand an der Spitze ($BI_3 = 1,65$), gefolgt von den Items I51/I71 (Planetenbewegung) und I26 (Jahreszeiten). Die Skala wird bei Jungen angeführt von I21 "Themen, die mit Raumfahrt zu tun haben, besprechen" ($BI_{21} = 1,94$) und I40 (Lichtschranken).

Der Vergleich der unteren Ränge ist noch interessanter. Lediglich I35 "Ein Kurzreferat über die in einem Prospekt angegebenen Leistungsdaten eines Automotors halten" stößt auf gemeinsame Ablehnung - vermutlich wegen der Behandlungsform "Referat halten". Am unteren Ende der Skala der Einzelbewertungen liegen bei Jungen Items mit Inhalten aus den Bereichen 'Naturphänomene' und 'Wissenschaftstheorie' (I10, I57, I12). Bei den Mädchen sind es Themen, die mit Formeln zu tun haben (I20, I31, I61) und Items aus dem Bereich 'Technik' (I6, I41, I45).

Auf einen Vergleich von Grund- und Leistungskursen kann verzichtet werden. Die Unterschiede sind grundsätzlich geringer als zwischen Mädchen und Jungen. Sie können zu einem Teil durch den weitaus höheren Mädchenanteil in Grund- als in Leistungskursen erklärt werden.

Die Ergebnisse des differentiellen Interessentests belegen das Interesse von Jungen an Themen mit Technikbezug. Das stützt die Aussage des Vorverständniselements AI3 - auch wenn der darin formulierte Zusammenhang zwischen dem Interesse an solchen Fragestellungen und einer Abwendung von begrifflich-prinzipiellen Phänomen-Strukturierung dadurch nicht automatisch belegt ist. Mädchen bringen technischen Themen kein besonderes Interesse entgegen. Sie wählen bevorzugt Phänomene der natürlichen Umwelt. Aufgrund der geringen Zahl von Mädchen in den Kursen, die durchgehend empirisch begleitet wurden, liegen zu wenige Daten vor, um auf Unterrichtsprotokollen eine geschlechtsspezifische Analyse des Verhaltens in entsprechenden Unterrichtssituationen vornehmen und die Ergebnisse der schriftlichen Erhebung verifizieren zu können.

B.3.2.3.3 · Allgemeines Interesse 4: Interesse am Experimentieren

AI4: Schüler experimentieren gerne. Der Umgang mit Versuchsmaterialien stellt, unabhängig vom Thema des Versuchs, einen Wert an sich dar.

Struktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Das Interesse von Schülern am Experimentieren ist keine überraschende Erkenntnis. Das Element AI4 beschreibt einen Sachverhalt, der Lehrern und Fachdidaktikern bekannt ist. Eine differenziertere Betrachtung zeigt, daß der Umgang mit Geräten aus der Physiksammlung einen Wert an sich darstellt, hinter den die mit dem Versuch verbundene Fragestellung zurücktreten kann. Die Lust am Experimentieren ist zunächst themenunabhängig. In SVUs klingt die erste Begeisterung über die Möglichkeit, nach eigenen Wünschen Geräte auszuwählen und Versuchsanordnungen aufzubauen, meist erst nach 1 bis 2 Stunden ab. Danach beginnen die Schüler, genauere Bezüge zwischen den Aufbauten und dem Thema ihrer geplanten Untersuchung herzustellen. Der Abschnitt des spielerischen Umgangs mit den Materialien und des Ausprobierens ihrer Möglichkeiten ist in einen SVU von vornherein zeitlich einzuplanen.

Schüler sind wenig gewillt, sich zur Vorbereitung auf die Durchführung von Meßreihen genauer mit dem theoretischen Rahmen auseinanderzusetzen, in den diese eingebettet sind. Sie müssen zur Bildung von Hypothesen und zu Reflexionsphasen besonders angehalten werden, um auf der Grundlage von Zwischenergebnissen über mögliche Konsequenzen für Änderungen der Fragestellung oder die Anpassung der weiteren Vorgehensweise nachzudenken. In SVUs sollte die Geräteausgabe erst dann erfolgen, wenn die Gruppe eine genaue Beschreibung ihres Themas und eine Grobplanung der Arbeitsschritte erläutern kann.

Mit diesen Ausführungen sollte das Interesse am Experimentieren, das dem Kompetenzerwerb in einer empirischen Naturwissenschaft sicherlich zugute kommt, problematisiert werden. Wissenschaftslogisch stehen Experimente im Kontext von Forschungsprogrammen. Sie sind auf die Klärung vorher formulierter Fragestellungen abgestimmt. In der Schule droht dieser Aspekt durch das große Interesse am Experimentieren manchmal unterzugehen. Oftmals stehen die Ergebnisse von vornherein im Detail fest und sind den Schülern bekannt, so daß es tatsächlich mehr auf die Durchführung ankommt als auf das Ergebnis. Lind (1979) hat solche Experimente in einer Gegenüberstellung von Kuhns Phasen-Modell der naturwissenschaftlichen Forschung und vergleichbarer Unterrichtssituationen als "quantitative, messende Versuche mit vorgegebenen Fragestellungen" bezeichnet und

darauf hingewiesen, daß ununterbrochener "Normalunterricht" (der Begriff ist analog zu Kuhns "Normalwissenschaft" gebildet) nur ein Zerrbild von Wissenschaft vermittelt. Normalunterricht müsse sich, wie in der Wissenschaft normalwissenschaftliche und außerordentliche Phasen, mit forschendem Unterricht abwechseln, in dem die Ergebnisse von Untersuchungen für die Schüler offen sind.

Es gilt, das Interesse am Experimentieren, das bei Schülern in großem Maße vorhanden ist, für Erwerb und Ausbau begrifflich-struktureller Kompetenz fruchtbar zu machen. Das Ziel ist auch in daraufhin angelegten SVU-Phasen nicht leicht zu erreichen. Vielleicht ist aber das Maß, in dem Schüler sich auf die Tätigkeit des Experimentierens konzentrieren, Ausdruck von gewissen "Entzugserscheinungen", die sich durch eine Erweiterung der Schülerpraktika in der Sekundarstufe II abbauen lassen.

Diskussion des Elements an Beispielen

Beliebtheit der Handlungsform "selber experimentieren"

Im differentiellen Interessentest ITM (siehe B.2.2.1) ergab die Faktorenanalyse als einen von 6 inhaltlich interpretierbaren Faktoren: '(selber) experimentieren'. Es ist dies der einzige Faktor, der sich über die Handlungsform konstituiert. Alle anderen Faktoren sind jeweils durch einen Gegenstandsbereich gekennzeichnet. Die Bewertung der 71 Items des Tests erfolgte primär auf der Grundlage der thematischen Inhalte. Interessenunterschiede zwischen Mädchen und Jungen machen sich ebenfalls an Inhaltsbereichen fest (siehe dazu B.3.2.3.2). Daher ist die Konstitution des Faktors '(selber) experimentieren' über die Handlungsform um so bedeutsamer. Vier Items, die auf den Faktor hoch laden, lauten (in Klammern ist der Item-Beliebtheitswert angegeben):

- I15) Eine Versuchsanordnung selbst entwerfen und zusammenbauen. ($BI_{15} = 2,18$)
- I29) Versuche selbst ausdenken. ($BI_{29} = 2.24$)
- I36) Mechanische Experimente in Gruppenarbeit durchführen. ($BI_{36} = 2,21$)
- I38) Forschungsmethoden der Physik selbst anwenden. ($BI_{38} = 2,26$)

Nach den Beliebtheitsindizes $\overline{BI}$ und $\overline{BI}^*$ wurde ermittelt, daß der Faktor bei Jungen an erster, bzw. zweiter Stelle steht und bei Mädchen ebenfalls auf den vorderen Rängen liegt (vgl. Tabelle auf S. 236).

In Befragungen nach der Durchführung von SVUs wurde von Schülern die Möglichkeit zum eigenständigen Experimentieren besonders positiv hervorgehoben. Drei typische Antworten auf die Frage "Was hat Dir an der Unterrichtseinheit besonders gut gefallen?" lauteten beim SVU 'Magnetismus':

- "Das eigene, selbständige Arbeiten mit Geräten an selbstgewählten Themen."
- "Freie Auswahl der Durchführung der Versuche."
- "Selbst Fragen überlegen, Versuche selbst machen, ausführliche Versuche machen (kein Zeitdruck)."

Die Überlegungen zur Wahl eines Themas für die Gruppenarbeit im SVU werden von der Frage mitbestimmt, wie die mit dem Thema verbundenen Experimentiermöglichkeiten aussehen. Ein Auszug aus einem Gespräch mit einer Schülergruppe über die Gründe für die Wahl ihres Themas ('Magnetfeld in einer Spule'):

- S 1 Von den Themen an der Tafel haben wir uns das ausgesucht, das am meisten Spaß macht.
- S 2 Ich fand es ganz interessant, hier so Versuche zu machen mit Spulen und so.
- S 3 Ich habe privates Interesse daran - Elektronik und so - Elektromagnetismus, Spule, Induktion und so. Das kann man z.B. bei Lautsprechern ganz gut gebrauchen.
- S 2 Hier kann man besonders viel experimentieren.

Daß der Umgang mit Experimentiermaterialien, besonders mit aufwendigen Geräten, einen Wert an sich darstellt, zeigt der folgende kurze Wortprotokollauschnitt:

- Robert Können wir jetzt auch mal an eine Luftkissenbahn? Wir waren das letzte Mal an einer Schwefelbahn.
- Lehrer Das ist doch nicht so erheblich.
- Robert Das ist sogar sehr erheblich.

*

Vorgehensweise im SVU

Wir haben in der Einleitung über die Gefahr gesprochen, daß Schüler beim Experimentieren die eigentliche Fragestellung, zumindest zeitweise, aus den Augen verlieren. Der Eigenwert des Experimentierens überdeckt dann das untersuchte Phänomen oder die zu prüfende Hypothese. Der Schritt des Aufbaus eines Erwartungshorizonts kann sogar ganz entfallen. Solches Verhalten war speziell in den bereits mehrfach angesprochenen SVUs zum Thema Magnetismus (12. Klasse, Leistungskurse) zu beobachten. Die Vorgehensweise der Gruppen war in

der zeitlichen Abfolge der Arbeitsschritte auffallend gleichartig:

1. Geräte beschaffen (möglichst alle greifbaren, die irgendwie mit dem Thema zu tun haben könnten) und ausprobieren, Versuchsanordnung zusammenbauen und verschiedene Varianten ausprobieren.
2. Verschiedene Meßreihen durchführen. (Wie ändert sich die Größe A, wenn ich die Größen B, C, ... verändere?)
3. In Büchern über die Experimente nachlesen und die theoretischen Grundlagen erarbeiten.

Zur Einleitung der dritten Phase mußten die Schüler teilweise vom Lehrer angehalten werden.

In der ersten Stunde des SVU, nachdem die Gruppen eine grobe Idee von einem Untersuchungsthema hatten, das oft nur in einem Schlagwort wie 'Lorentz-Kraft' oder 'Spulen' bestand, fragte der Lehrer, wie man jetzt weiter vorgehen solle.

S 1 Wenn jeder jetzt ein Thema hat, also was die Leute machen wollen, dann wäre es sinnvoll, Versuche zu machen - damit die Geräte da sind für die nächste Stunde.

S 2 Ja, aber es gibt doch nicht zu jedem Thema einen Versuch.

Lehrer Wir sollten erstmal soweit kommen, daß jeder ein Thema hat. Dann fände ich ganz wichtig, daß wir das auch gegenseitig absprechen.

S 3 Wir sollten nach Geräten suchen, die man dazu braucht.

Das Experimentieren steht im Zentrum der Überlegungen. Die Einstellung lautet: "Warum soll man lange vorher überlegen - am besten, man probiert es aus." Die Frage muß erlaubt sein, ob sich hier neben dem Interesse am Experimentieren auch die Erfahrung eines Physikunterrichts widerspiegelt, in dem, aufbauend auf einer falsch verstandenen Induktionslogik, Gesetze auf direktem Wege aus Experimenten abgeleitet werden (siehe dazu Niedderer 1982, 107; Jung 1970, 22).

*

Gegenbeispiel: Spaß am Spekulieren

Wir haben bisher über Beispiele berichtet, in denen Schüler sich auf die Tätigkeit des Experimentierens konzentriert und das Moment des vorgeschalteten Überlegens und kreativen Spekulierens hintangestellt haben. Es liegen aber auch Unterrichtsprotokolle vor, in denen Schüler intensiv über den zu erwartenden Ausgang eines Experiments diskutieren, was auf ein Interesse am Theoretisieren verweist. Die Beispiele stammen aus solchen Situationen, in denen Phänomene anstanden, die zum einen so offen waren, daß sich unterschiedliche Standpunkte

ausbilden konnten und zum anderen so beschaffen, daß die Schüler meinten, das Problem eigentlich lösen können zu müssen, sie sich also nicht überfordert fühlten. Zur Unterstützung sind experimentelle Anordnungen geeignet, die nach den Wünschen der Schüler variiert werden können. Wichtig ist, daß eine Diskussion unter den Schülern in Gang kommt. In solchen Situationen sollte sich der Lehrer dann mit eigenen Aussagen stark zurückhalten.

Wir haben ein Beispiel aus einem Grundkurs ausgewählt. Thema war die Flugbahn einer Stahlkugel, die man an einem Band im Kreis herumschleudert und schließlich losläßt. Zunächst kamen nur wenige Äußerungen. (Auf Inhalte gehen wir nicht ein.) Nach einiger Zeit machte ein Schüler den Vorschlag, es am besten mal auszuprobieren. Der Lehrer blockte ab: "Ja, ich möchte aber gern, daß wir vorher mal überlegen, wie es sein mußte." Nach und nach belebte sich das Gespräch dadurch, daß unter den Schülern über gegensätzliche Standpunkte diskutiert wurde. Nach circa 25 Minuten mußte dann der Lehrer den Vorschlag machen, nun doch das Experiment durchzuführen. In einem Leistungskurs kam es am gleichen Thema ebenfalls zu längeren, lebhaften Diskussionen.

B.3.3 Vorverständniskomponente II: Präkonzepte und spezifische Interessen (P/SI)

B.3.3.1

Bereich I: Kinematik

B.3.3.1.1 Spezifisches Interesse 1: Interesse an der Dynamik von Bewegungen

SII: Schüler interessieren sich weniger für kinematische als für dynamisch-energetische Betrachtungen von Bewegungsverläufen. Sie fragen nach den Ursachen von Bewegungen und nach den auftretenden 'Kräften'.

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Als erstes geht es in Mechanikkursen in der Sekundarstufe II um die Aufzeichnung und Beschreibung von Bewegungsverläufen. Das Teilgebiet Kinematik führt die Begriffe Ort, Weg, Zeitpunkt, Zeitraum, Geschwindigkeit und Beschleunigung ein. Die Bezeichnung der Kinematik als "Bewegungslehre" bedarf zweier Relativierungen:

1. Kinematik ist in ihren Grundlagen eine Lehre von den einfachen, idealen Bewegungen: gleichförmige und gleichförmig beschleunigte Bewegungen in einer Dimension, deren Überlagerung in zwei Dimensionen, später gleichmäßige Drehbewegungen. Bewegungen in der alltäglichen Umwelt sind ungleich komplexer: Menschen bewegen sich, Autos fahren, Wolken ziehen, usw. Praktisch nirgendwo findet man geradlinig gleichförmige oder gleichförmig beschleunigte Bewegungen.
2. Die Ursachen von Bewegungen, bzw. Bewegungsänderungen, bleiben ausgeklammert. Es werden lediglich Bahnkurven, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe dargestellt.

Diese Bescheidung liegt quer zu den Interessen der Schüler. Sie möchten von vornherein die dynamisch-energetischen Aspekte von Bewegungen einbeziehen. Das ist bei der Struktur ihrer Alltagserfahrungen - Anstrengung beim Radfahren, Benzinverbrauch von Autos, Ermüdung beim Laufen - naheliegender als eine Beschränkung auf Bahnkurven. Die Transformation der Vielfalt lebensweltlich bekannter Bewegungstypen auf die von der physikalischen "Bewegungslehre" bereitgestellten Idealtypen verlangt von den Schülern ein großes Maß an Reduktion von Komplexität, den Verzicht auf die Berücksichtigung der Ziele und Zwecke von Bewegungen und die (zeitweise) Aufgabe der Frage nach den Ursachen und den auftretenden 'Kräften'. An die Stelle der (eigenen) anstrengen-

den Bemühung, mit einem Fahrrad ein bestimmtes Ziel zu erreichen, tritt die Angabe einer $s(t)$ -Funktion für einen Massepunkt. Die Beschränkung auf rein kinematische Betrachtungen fällt Schülern dementsprechend schwer. Jung (1981a, 131) hat das Problem des Sich-Einstellens auf einfache Fragen in einem anderen Zusammenhang so formuliert:

Für die mechanische Einwirkung ist nicht weiter wichtig, wodurch sie ausgelöst wird; häufig wird (von Schülern) alle Denkenergie auf diese weitergehende Frage verwendet, weil kausal und nicht funktional gedacht wird. (...) Ein Hauptproblem scheint zu sein, daß der Lerner sich nicht entschließen kann, bescheidene Fragen zu stellen, weil habituell sein Interesse Fragen der Verursachung und der Schuldzuschreibung gilt.

Der interessante Gesichtspunkt bei Bewegungen ist für Schüler nicht die exakte Beschreibung des "Wie", sondern die Erklärung des "Wodurch/Warum". Die Bewegungslehre des Aristoteles und die Impetustheorien kannten ebenfalls keine Trennung in zwei Bereiche, die wir heute Kinematik und Dynamik nennen. Bahnkurven waren verzahnt mit wirkenden Kräften, Zielen und Zwecken. Man denke an die Fallbewegung als Streben des Körpers zu seinem natürlichen Ort. Der Begriff des 'Impetus' ("eingeprägte Kraft") vereinigte Bewegungszustand und Bewegungsursache. Hier zeigen sich Parallelen zwischen Schülerpräkonzepten/-interessen und frühen Konzepten der Physik. Feyerabend (1976, 143) nennt als einen Grund für das Verschwinden des 'Impetus' die Verschiebung der Interessen von der Ergründung des "Warum" hin zum "Wie". Erst Galilei begründete eine Kinematik im heutigen Sinn (siehe dazu Kapitel D, Punkt D.3.4).

Unterrichtlich äußert sich das Interesse an den dynamisch-energetischen Aspekten von Bewegungen deutlich in den Anfangsstunden der Mechanikkurse. Durch Einstellung auf die vom Lehrer vorgegebenen Themen lassen sich Schüler später auf rein kinematische Betrachtungen ein. Spontane schülereigene Einfälle bringen jedoch auch dort immer wieder den 'Kraft'-Aspekt ein.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Assoziatives Umfeld von "Bewegung"

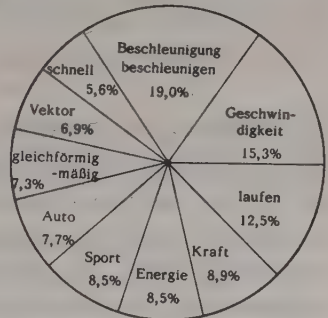
Die dynamisch-energetische Qualität des Begriffs "Bewegung" zeigt sich in vielen Kontexten, in denen Schüler über Bewegungen sprechen. Dazu einige Zitate aus Wortprotokollen:

- "Wenn die Kugel rollt, hat sie eine gewisse Bewegung in sich."
- "Die Kugel hat einen Vorrat an Vorwärtsbewegung."
- "Kraft und Bewegung, das ist quasi dasselbe."

- "Beschleunigung ist Kraftanwendung zur Bewegung in eine Richtung."
- "Beschleunigung ist die Energie, die aufgewendet werden muß, um die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs zu erhöhen."
- "Bewegung ist eine Kraft."

Zur Erkundung des assoziativen Umfelds von "Bewegung" wurde ein Assoziations-test durchgeführt (ATB, siehe B.2.2.2). Zu dem Stichwort kamen 190 verschiedene Assoziationen in 638 Nennungen. Durch Zusammenfassung homologer Begriffe wurde die Zahl auf 130 reduziert. Unter den 10 am häufigsten genannten Begriffen ergab sich die folgende prozentuale Verteilung:

1. Beschleunigung/beschleunigen	19,0%
2. Geschwindigkeit	15,3%
3. laufen	12,5%
4. Kraft	8,9%
5. Energie	8,5%
6. Sport	8,5%
7. Auto	7,7%
8. gleichförmig/gleichmäßig	7,3%
9. Vektor	6,9%
10. schnell/Schnelligkeit	5,6%

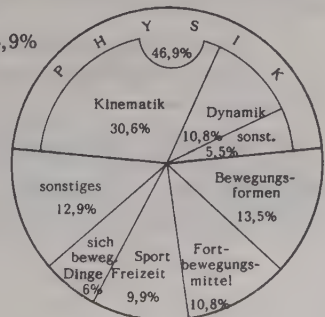


N = 242 Nennungen
(das entspricht 38% der insgesamt
638 Nennungen.)

Unter den zehn am häufigsten genannten Begriffen dominieren physikalische gegenüber solchen aus den lebensweltlichen Bereichen Sport und Fortbewegung. An erster Stelle stehen "Beschleunigung" und "Geschwindigkeit". In einem Assoziationstest kann nicht erhoben werden, inwieweit die Begriffe physikalisch oder umgangssprachlich assoziiert wurden (z.B. "Geschwindigkeit" als "Schnelligkeit" oder "Rasanz"). Der gleiche Vorbehalt gilt für "Kraft" und "Energie". Es fällt auf, daß die kinematischen Basisbegriffe Weg und Zeit keine besondere Rolle spielen. Die These von der dynamisch-energetischen Besetzung des Begriffs "Bewegung" findet durch die Ergebnisse des Assoziationstests jedoch keine Unterstützung. Begriffe aus der Kinematik überwiegen solche mit dynamischen Anklängen auch bei der Betrachtung der Verteilung aller Assoziationen auf bestimmte Oberkategorien:

1. Physik (überwiegend kinematische Begriffe)	46,9%
2. Bewegungsformen (laufen, fahren)	13,5%
3. Fortbewegungsmittel (Auto, Fahrrad)	10,8%
4. Sport, Freizeit	9,9%
5. sich bewegende Dinge (Erde, Wasser)	6,0%
6. sonstiges	12,9%

N = 638 Nennungen



Nahezu die Hälfte aller freien Assoziationen stammt aus der Physik (mit den vorhin gemachten Einschränkungen). Zur Erklärung kann auf die Randbedingungen der Befragung verwiesen werden: Physikkursschüler wurden am Ende eines Halbjahreskurses über Mechanik in einer Physikstunde befragt. Wir führen den geringer als erwartet ausgefallen Anteil freier Assoziationen mit dynamisch-energetischem Anklang ("Kraft", "Energie", Sport-/Freizeit-Bereich) darauf zurück, daß durch die ausführliche Behandlung der Kinematik eine dynamisch-energetische Sichtweise von Bewegungen aufgelockert wurde, für die wir Belege besonders aus der Anfangsphase von Mechanikkursen haben.

*

Die Beschreibung von Bewegungen - Fallstudien

Die beiden Stunden, aus denen wir gleich längere Protokollauschnitte diskutieren, stammen vom Beginn eines Leistungs- und eines Grundkurses über Mechanik. Es hatte noch keine Einengung auf Kinematik stattgefunden. In den ersten, noch unbeeinflussten Ideen für mögliche Fragestellungen bei der Untersuchung von Bewegungen kommen die Interessen der Schüler deutlich zum Tragen.

Im ersten Beispiel machen Schüler vier Versuchsvorschläge, die im Hinblick auf das postulierte Interesse an den dynamisch-energetischen Aspekten von Bewegungen beurteilt werden können. Der Lehrer leitete die Stunde folgendermaßen ein:

Lehrer Wir wollen heute direkt in die Beschreibung von Bewegungen einsteigen. Habt ihr irgendwie Ideen, was wir da machen könnten? Es soll einfach etwas zur Bewegung sein. Vielleicht könnt ihr rausgehen und mit dem Fahrrad Versuche machen. Es kommt hier dann hauptsächlich auf den Zusammenhang von Weg und Zeit an. Es kann z.B. eine kurze Strecke mit dem Fahrrad erfaßt werden. An einem Kilometerzähler kann dann sofort der Weg abgelesen werden.

Der Lehrer versucht, einfache Weg-Zeit-Messungen anzuregen. Vor dem Hintergrund dieser Lenkung sind die Einfälle der Schüler, die mehrheitlich andere Aspekte als Weg und Zeit betonen, besonders signifikant.

- S 1 Wie oft man treten muß, das kann man ja zählen. Dazu muß dann die Übersetzung ausgerechnet werden.
- S 2 Man kann auch eine bestimmte Strecke abmessen. Mit einer Uhr kann man die Zeit messen. Derjenige, der dann die Strecke abfährt, muß dies mit verschiedenen Geschwindigkeiten tun.

Die ersten zwei Schüler äußern Ideen, die sich an den Lehrer Anregungen orientieren. Der Lehrer greift die Vorschläge auf:

Lehrer Gut, laßt uns erstmal notieren, was man alles so machen kann. - Einmal haben wir das Durchfahren einer festgelegten Strecke. Dazu kommt eine Zeitmessung. Fällt euch sonst noch etwas ein?

Tom Mit dem Fahrrad schnell fahren, dann ausrollen lassen und dann diese Rollstrecke messen. Natürlich ist da auch noch ein Widerstand da.

Lehrer Und was würdest du da für einen Zusammenhang messen?

Tom Wie groß der Widerstand ist.

Lehrer Das wäre eigentlich eine Untersuchung der Reibung. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit kann man das ja nicht sagen, weil die ja abnimmt. Höchstens kann man den Weg ändern.

"Eigentlich wäre das eine Untersuchung der Reibung": Der Lehrer hält die Fragestellung im Hinblick auf die Einführung kinematischer Begriffe nicht für sinnvoll. Kai führt Toms Vorschlag jedoch weiter aus.

Kai Man könnte vielleicht den Versuch so machen, daß man viele Leute den gleichen Weg fahren läßt, so daß verschiedene Gewichte den gleichen Weg fahren. Vom Gewicht her müßten ja die Schwereren die höhere Reibung haben.

Toms und Kais Ideen laufen auf eine Untersuchung des Zusammenhangs von Bewegung und Bewegungswiderständen hinaus (Rollreibungskräfte). Der Lehrer akzeptiert den Vorschlag, weil in seine Durchführung die Bestimmung der Größen Weg, Zeit und Geschwindigkeit einflösse.

Lehrer Also, bei verschiedenen Geschwindigkeiten und gleicher Masse die Reststrecke messen. Das wäre für eine Gruppe, die ihre Versuche mit dem Fahrrad macht, ein ganz gutes Übungsprogramm.

S 3 Man kann auch etwas fallenlassen und die Strecke messen.

Lehrer Also können wir jetzt einen weiteren Punkt "freien Fall" nehmen.

Kai Bei dem freien Fall könnte man auch verschiedene Sachen fallenlassen, z.B. Kugeln oder ein Blatt Papier - das schwebt ja dann wohl mehr.

Der Vorschlag, Fallexperimente zu machen, findet beim Lehrer Unterstützung. Fallexperimente gehören zu den Standardbeispielen in der Kinematik. Schüler interessieren sich jedoch eher für den Einfluß von Gewicht, Form und Volumen der Körper als für den freien Fall als Prototyp einer gleichförmig beschleunigten Bewegung. Das klingt in Kais letzter Äußerung an.

(...)

Lehrer Was hätten wir denn noch für Möglichkeiten? Etwas, was man hier auch im Raum machen kann.

S 4 Wir könnten ein kleines Wägelchen nehmen, es schieben oder von einer schiefen Ebene rollen lassen. Dies muß dann mit verschiedenen Massen und Gewichten geschehen. Können wir denn hier so etwas aufbauen? Eine Bahn, auf der dann der Waggon rollt, so daß man messen kann, wie weit er gerollt ist?

Lehrer Ja, solche Sachen haben wir da.

Danach beginnt die Gruppeneinteilung für die Experimente.

Es liegen vier Vorschläge vor:

- einfache Weg-Zeit-Messungen an Fahrrädern
- Untersuchung der Abhängigkeit des Rollwiderstands vom Gewicht eines Radfahrers
- Experimente zum freien Fall
- Bewegungen auf einer schiefen Ebene in Abhängigkeit vom Gewicht eines Experimentierwagens

Außer beim ersten Vorschlag sind dynamisch-energetische Aspekte Grundlage der Ideen. Weg-Zeit-Messungen sind zwar inbegriffen, aber nicht das eigentliche Ziel.

*

Das zweite Unterrichtsprotokoll aus der Anfangsphase eines Grundkurses soll die Schwierigkeiten von Schülern dokumentieren, sich auf die kinematische Betrachtung von Bewegungen einzustellen. Als Einstieg in die Stunde diene die Demonstration der Bewegung kleiner Papierkegel, die aus einer Höhe von zwei Metern auf dem Boden schweben.

Lehrer Wie kann man die beschreiben - die Bewegung von den Hütchen?

Conrad Ich meine, die bewegen sich abwärts. Die werden wahrscheinlich von der Erde angezogen. Und da sie relativ leicht sind, werden sie nicht so stark angezogen, weil sie ja auch noch einen relativ starken Luftwiderstand haben - im Vergleich zu ihrem Gewicht.

Die Beschreibung der Bewegung beschränkt sich auf "abwärts". Conrad wendet sich der Erklärung der Bewegung zu.

Lehrer Kann man die irgendwie noch genauer beschreiben, außer so in Worten?
- Wenn einer euch fragt: Hütchen - wie ist das denn so, wenn ich die fallen lasse? Was für eine Bewegung ist das?

S 1 Abwärtsbewegung.

Lehrer Abwärts - das ist ein bißchen wenig.

Die Frage "Was für eine Bewegung ist das?" ist im Vorverständnis der Schüler mit der Angabe "abwärts" befriedigend beantwortet. Die Schüler verstehen das Nachhaken des Lehrers so, als ginge es ihm um die genauere Erfassung der Ursachen.

Kurt Das dreht sich so hin, daß es den geringsten Luftwiderstand leistet.

Lehrer Was gibt es denn noch für Beschreibungsmöglichkeiten für so eine Bewegung? - Wenn ihr einem sagen sollt: so bewegt sich das Ding.

S 2 Fällt.

Lehrer Gut, das fällt runter. Aber man kann es noch genauer machen.

S 3 Daß es irgendwie angezogen wird.

Lehrer Gut, das sind jetzt Fragen von Ursachen - warum das runterfällt. Da werden wir uns auch noch mit beschäftigen. Ihr habt sicherlich etwas Wichtigeres zu erzählen - aber nehmen wir an, ihr sollt den Vorgang genau beschreiben.

Der Lehrer blockt die Frage nach den Ursachen der Fallbewegung ab. Die Schüler sehen sich gezwungen, ihre ursprüngliche Denkrichtung zu verlassen. Sie müssen herausfinden, worauf der Lehrer hinauswill.

Schüler (langes Schweigen)

S 4 Wie das runterfällt, oder was?

Lehrer Ja, was sind denn das für Größen, die bei der Bewegung da eine Rolle spielen? Wenn sich irgendwas bewegt - z.B. Hütchen - was für eine Angabe würdet ihr machen?

S 5 Das Gewicht vielleicht - Die Kraft, die an dem Gewicht -

Kurt Die Energie, die in dem Hütchen steckt, wenn es oben gehalten wird - die Höhenenergie.

Nils Zeit und Weg.

Zwei Schüler denken wiederum an dynamisch-energetische Größen. Erst Nils bringt Zeit und Weg ein. Während der Lehrer auf die Antworten von S 5 und Kurt nicht eingeht, verstärkt er sofort "Zeit und Weg". Schülern, die die Spielregeln des Unterrichtsdiskurses gelernt haben, wird dadurch klar, was der Lehrer erwartet.

Lehrer Was nützt das, wenn du Zeit und Weg angibst?

Nils Ja, z.B. wieviel Sekunden das für den Weg da - Geschwindigkeit.

Lehrer Geschwindigkeit, was ist das denn?

Der Begriff Geschwindigkeit ist nun gefallen. In der sich anschließenden Passage wird über die Bedeutung des Begriffs gesprochen. Nachdem er vorläufig geklärt ist (Nils: "Der Weg, der zurückgelegt wird in - praktisch Sekunden"), greift der Lehrer die Ideen der Schüler zur Beschreibung von Bewegungen wieder auf. Er möchte die Unterschiede zwischen Beschreibungen mittels Weg/Zeit/Geschwindigkeit und Kraft/Energie/Widerstand herausarbeiten. Wir fahren dort im Protokoll fort.

Lehrer Jetzt haben wir hier zwei Arten von Beschreibungsmöglichkeiten. Das waren einmal so Sachen wie Kraft, Energie, Widerstand, glaube ich (schreibt die Begriffe auf die linke Tafelhälfte). Und dann war hier sowas mit Weg, Zeit, Geschwindigkeit (rechte Tafelhälfte).

S 5 Und Gewicht.

Lehrer Das sind sicher Beschreibungsmöglichkeiten, die alle irgendwas mit der Bewegung der Hütchen zu tun haben. Aber - unterscheiden die sich irgendwohin?

Lutz Ja, sicher. Die unterscheiden sich in ihrer Bedeutung in jedem Fall. Die hängen jeweils von was anderem ab. Z.B. die Zeit hängt vom Weg oder der Geschwindigkeit ab.

Die Differenzierung der beiden Begriffsgruppen stammt vom Lehrer. Schüler sehen sie eher zusammengehörig. Lutz unterscheidet zwischen Einzelbegriffen, nicht zwischen den Gruppen.

S 2 Ich würde eher sagen, die hängen alle eher zusammen. Die gehören eigentlich zusammen, diese Begriffe. Denn wie lange ein Gegenstand braucht, um irgendwas zurückzulegen, das hängt sowohl vom Widerstand, Energie, Kraft und Gewicht ab - das hängt alles davon ab.

Lehrer Wenn ihr sagt, das hängt alles zusammen, dann ist das sicherlich richtig. Das hängt irgendwie voneinander ab. Aber wenn ich eine Bewegung beschreiben will, welche Größen brauche ich dann? - - - Ich will jetzt einem anderen mitteilen, wie sich das Hütchen bewegt hat. Welche Größen muß ich dann angeben?

Schüler (langes Schweigen)

S Können Sie die Frage nochmal wiederholen!

Der Konflikt zwischen Lehrervorverständnis und Schülervorverständnissen ist offensichtlich. Seine Quellen liegen in Folgendem:

- Bewegungen sind für Schüler dynamisch-energetische Vorgänge. Ihr Interesse gilt mehr den Ursachen und den auftretenden 'Kräften', also dem "Wodurch" und "Warum".
- Die Schüler vermuten hinter den Lehrerfragen kompliziertere Zusammenhänge als "nur" Ort und Zeit. Diese Aspekte erscheinen ihnen zu simpel. Im Physikunterricht kann es doch nicht um so einfache Dinge gehen (?)

Lehrer (wiederholt die Frage)

S Alle!

Lehrer Alle? - Mit den Hütchen ist das nicht so alltäglich, das jemandem zu beschreiben. Aber: Ich will jemandem ein Auto beschreiben. Das hat sich bewegt, und ich will auch beschreiben wie. Was für Größen gebe ich dann an?

Schüler (langes Schweigen)

Lehrer Z.B. Unfall, oder so.

Thomas Also, erstmal für die Bewegung des Autos die mechanische Energie, die umgewandelt wird in Bewegungsenergie.

Lehrer Du bist doch Motorradbastler, nicht? Würdest du sagen: Ich habe einen astreinen Bock, da wird soundsoviel Bewegungsenergie in Kraft umgewandelt, oder wie du das eben gesagt hast?

Thomas Nö.

Lehrer Wie beschreibst du es denn?

Thomas Ja, also ich sage: Das Auto fährt, weil es angetrieben wird.

Lehrer Ich will die Bewegung beschreiben.

Thomas Welche Bewegung? - Das rollt auf der Straße.

"Das Auto rollt auf der Straße" ist eine Beschreibung vom gleichen Typ wie "Das Hütchen bewegt sich abwärts". Wir zitieren zum Abschluß der Fallstudie eine längere Passage im Zusammenhang. Dem Lehrer gelingt es nur durch stark steuernde Impulse, die kinematischen Größen von den dynamisch-energetischen abzukoppeln. Für Schüler sind die Beschreibungsweisen zusammengehörig. Wie wir gesehen haben, liegt in spontanen Aussagen das Schwergewicht auf der zweiten Begriffsgruppe. Das stützt das Vorverständniselement S11.

Lehrer Da rollen viele Autos. Aber es gibt unterschiedliche. Was gibst du dann da an?

Thomas Die Geschwindigkeit.

Herbert Die Richtung.

Nils Die Leistung - was der Motor leistet, die Energie.

Lehrer Gibst du das an, wenn du hier so ein Auto wegfahren -

Nils Das hängt ja irgendwie auch von der Geschwindigkeit ab, oder nicht?

Lehrer Ich sag ja, das hängt alles zusammen. Aber die Frage ist, was gebe ich an, wenn ich das beschreiben will.

Kurt Wo sich das jeweilige Objekt befindet - ob das jetzt z.B. an einem steilen Hang ist. Da kann natürlich auch ein Auto schneller sein, als wenn ich jetzt im Flachland hier ankomme.

Conrad Also, der Weg und die Zeit. Und daraus ergibt sich halt dann auch die Geschwindigkeit.

Lutz Man gibt das an, was man am leichtesten auch bestimmen kann. Ich weiß nicht - man kann den Widerstand ja schlecht bestimmen oder die Energie, den Verbrauch.

Lehrer Also, was würdest du angeben?

Lutz Ja, die Geschwindigkeit.

Lehrer Wenn ich die Bewegung beschreibe, gebe ich die Geschwindigkeit an. Und die hängt zusammen mit Weg und Zeit. Und wie hängen diese 4 anderen Größen damit zusammen?

Thomas Also, die Geschwindigkeit - jetzt mal bei diesen Hütchen - ist abhängig vom Widerstand und vom Gewicht.

Lehrer Das sind irgendwie Ursachen, daß sich das Ding überhaupt bewegt und daß es sich gerade in der Weise bewegt. Das eine ist die Frage, wie es sich bewegt; das andere ist die Frage nach der Ursache. Wir wollen uns erstmal damit beschäftigen, wie es sich bewegt. Später kommen wir darauf zurück, warum es sich eigentlich bewegt. Die schöne Überschrift über dieses Kapitel ist Kinematik.

Die in der Einleitung erläuterte Bescheidenheit kinematischer Fragestellungen

muß an geeigneter Stelle thematisiert werden. Fruchtbare Momente liegen vor, wenn im Unterricht Konflikte aufgrund abweichender Schülerinteressen auftreten. Ein kurzer Hinweis "Wir wollen uns erstmal damit beschäftigen, wie es sich bewegt" läßt den Sinn der Entkopplung von Kinematik und Dynamik nicht erkennen. Konflikte mit den Schülerinteressen können durch Thematisierung des spezifischen Fragehorizonts der Kinematik nicht behoben, aber doch auf eine Ebene gehoben werden, auf der sie bewußt verarbeitet werden können.

*

Einbringung der Dynamik in kinematische Betrachtungen

Ein kleines, aber sehr anschauliches Beispiel für das Interesse an den dynamischen Aspekten von Bewegungen wurde in einem Grundkurs beobachtet. Thema der Unterrichtseinheit war die Einführung der Begriffe Drehzahl, Umfangsgeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit. Dafür bekamen Schülergruppen experimentell zu bearbeitende Aufgaben. Eine Gruppe stellte Untersuchungen an Seiltrommeln mit verschiedenen Durchmessern an, die auf einer Motorachse angebracht waren. Es galt, die Geschwindigkeit, mit der ein Gewichtsstück von einer Seilwinde hochgehoben wird, mit den Abmessungen und der Bewegung der Seiltrommeln in Beziehung zu setzen. Nach dem Durchlesen der Versuchsanleitung sagte ein Schüler zu seinem Partner: "Man könnte auch die Zugkraft messen, aber das ist in der Aufgabe ja nicht gefragt."

Die Schüler stellten diese Idee zurück und bearbeiteten die vorgegebene Fragestellung. Danach jedoch besorgten sie sich selbständig in der Sammlung Kraftmesser (Federwaagen) und gingen daran, die "Zugkraft" des Motors zu bestimmen. Wäre das Thema frei wählbar gewesen, hätten sich die Schüler von vornherein dem dynamischen Gesichtspunkt zugewendet.

*

Häufig sprechen Schüler im Zusammenhang mit Bewegungen von der Kraftübertragung. Speziell bei Stoßvorgängen beschäftigt Schüler die Frage, wie und wieviel 'Kraft' zwischen den Körpern ausgetauscht wird. Wir haben dazu eine Fallstudie unter Punkt B.3.2.2.6 durchgeführt.

Im abschließenden Beleg zum spezifischen Interesse I zitieren wir aus einem Unterrichtsabschnitt über die Beschleunigung. Man kann die Tatsache, daß Schüler über lange Strecken bei kinematischen Betrachtungen verbleiben, nicht als Gegenbeleg zum primären Interesse an ihrer Dynamik werten. Schüler stellen

sich einfach auf die vom Lehrer gemachten Vorgaben ein. Die Disposition SII wirkt sich dann so aus, daß an unerwarteten Stellen dynamisch-energetische Aspekte eingebracht werden. In unserem Beispiel geschieht dies während einer Diskussion über Weg-Zeit-Messungen.

Lehrer Wir wollen jetzt mal eine andere Bewegung untersuchen, die nicht so schön im Labor stattfindet. Wir hatten eine Bewegung auf einer Fahrbahn, die extra für den Physikunterricht konstruiert worden ist. Und jetzt will ich mal eine Bewegung nehmen, die alltäglich vorkommt: Wie ist das, wenn ein Fahrrad anfährt. Das wollen wir jetzt beschreiben mit den Größen, die wir hatten: v , t , a , s . Was muß ich da überhaupt erstmal wissen von der Bewegung?

Uwe Wie das übertragen wird - die Kraft.

Lehrer Was interessiert mich da die Kraft? Haben wir die Kraft festgestellt, als wir den Wagen die schiefe Ebene haben runterfahren lassen? - Was für Meßgrößen brauchen wir, um eine Bewegung beschreiben zu können?

Detlev Ich würde sagen, eine Strecke und dann die Zeit, in der die Strecke zurückgelegt wurde.

Uwes Einfall überrascht den Lehrer. Er fällt mitten in eine Phase, in der ausführlich und ausschließlich mit kinematischen Begriffen gearbeitet worden war. Außerdem hatte der Lehrer in seiner Frage direkt auf die entsprechenden Größen verwiesen. (Detlev greift den kinematischen Faden wieder auf.) Wir werten die spontane Idee von Uwe als Aufblitzen des Interesses an der Dynamik von Bewegungen, das auch dann erhalten bleibt, wenn es durch unterrichtliche Vorgaben nicht zum Zuge kommen kann.

B.3.3.1.2 Präkonzept 1: Geschwindigkeit als Schnelligkeit

P1: Geschwindigkeit ist Schnelligkeit/Tempo.

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Die Reduktion der physikalischen Größe Geschwindigkeit auf ihren Betrag, das Tempo, ist ein Präkonzept, das auch nach der unterrichtlichen Behandlung funktioniert. Es ist häufig nicht so, daß Schüler die physikalische Bedeutung des Begriffs Momentangeschwindigkeit im Grunde verarbeitet haben und lediglich zeitweise den Vektorcharakter außer acht lassen, sondern vielmehr so, daß sie meinen, aus dem Alltagsgebrauch bereits zu wissen, was Geschwindigkeit bedeute und im Physikunterricht nur die entsprechenden Formeln dazulernen zu müssen. Die scheinbare Einfachheit des Begriffs bewirkt einen Mangel an Problembewußtsein und behindert dadurch die Verarbeitung wesentlicher Merkmale, die den physikalischen Geschwindigkeitsbegriff vom Alltagsbegriff unterscheiden:

- Geschwindigkeit als Relationsgröße
- Vektorcharakter
- Momentangeschwindigkeit als eigenständige Verhältnisgröße

Ein Körper "hat" eine Geschwindigkeit nur in Relation zu einem Bezugssystem. Intuitiv gibt es zwei "natürliche" Bezugssysteme: Entweder man nimmt sich selbst als Person zum Bezugspunkt oder die Erdoberfläche, bzw. das Laborsystem. Diese Systeme werden im Alltag nicht expliziert, so daß die Geschwindigkeit als Eigenschaft eines Körpers erscheint (vgl. Denkraumen 5 "Eigenschaftsdenken"; B.3.2.2.1). Eine Folge ist, daß es Schülern schwer fällt, negative Werte zu akzeptieren oder der Geschwindigkeit eines Körpers in verschiedenen Bezugssystemen unterschiedliche Werte zuzuordnen.

Der Vektorcharakter gehört zum Wesen des physikalischen Geschwindigkeitsbegriffs. Er ist insbesondere zum Verständnis des Beschleunigungsbegriffs unabdingbar. Für Schüler ist die Richtung jedoch oft nur der "eigentlichen" Geschwindigkeit (d.h. dem Tempo) hinzugefügt. Die Geschwindigkeit wird um eine Richtungsangabe ergänzt, ohne daß Tempo und Richtung miteinander zu einer neuen Größe verschmelzen. Daher gerät die Richtung leicht wieder in Vergessenheit, bzw. kommt erst bei genauerem Nachdenken wieder zu Bewußtsein. Als Kenntnis ist zumeist vorhanden, daß die Richtung zur Geschwindigkeit "dazugehört". Die bekannteste Auswirkung der Reduktion auf Schnelligkeit liegt darin, daß Schüler der gleichmäßigen Kreisbewegung eine konstante Geschwindigkeit zuordnen.

Die Momentangeschwindigkeit macht eine Aussage über den Bewegungszustand eines Körpers zu bestimmten Zeitpunkten (bei konstanter Masse). Die Größen Weg und Zeit verschmelzen im Grenzwert $\Delta t \rightarrow 0$ zu einer eigentständigen Verhältnisgröße, die mehr ist als eine Kombination aus Weg und Zeit. Aus entwicklungs- und kognitionspsychologischen Studien weiß man, daß Kinder über ein intuitives Verständnis von Geschwindigkeit als Grundgröße verfügen (siehe z.B. Rhöneck 1983). In der Sekundarstufe II bricht durch die Formalisierung des Geschwindigkeitsbegriffs ($v = \Delta s / \Delta t$) dieses intuitive Verständnis bei einigen Schülern auf. Mitverursacht durch Schwierigkeiten mit dem Grenzwertbegriff und der Differenzierung zwischen Zeiträumen und Zeitpunkten, kommt es zu der Vorstellung, ein Körper habe zu einem Zeitpunkt keine Geschwindigkeit, sondern nur einen Ort (vgl. Trowbridge 1980, 1024; Jung 1981a, 114).

Betrachtet man die Struktur des Präkonzepts I, so erscheint ein Überdenken der üblichen Vorgehensweise bei der Einführung des Geschwindigkeitsbegriffs notwendig. Der Einstieg über lineare, gleichförmige Bewegungen ist geeignet den Eindruck bei Schülern zu verstärken, man wisse bereits, was Geschwindigkeit sei, so daß bei der späteren Einführung der Momentangeschwindigkeit und des Vektorcharakters das Präkonzept nur noch schwer zu erschüttern ist. Es werden ihm allenfalls Kenntnisse beigelegt, die sich auf die Handhabung des Begriffs Geschwindigkeit bei der Strukturierung von Wahrnehmung jedoch kaum auswirken.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Geschwindigkeit heißt Tempo

Im ersten Beispiel zeigt sich, wie eng Geschwindigkeit an Tempo gekoppelt ist. In einem Grundkurs war über Kreisbewegungen gesprochen worden. Der Lehrer hatte die Gleichungen für Zentripetalbeschleunigung und -kraft hergeleitet und zeichnete entsprechende Vektorpfeile in eine Skizze ein. Daraufhin meldete sich ein Schüler:

- S 1 Wieso ist denn das da oben (deutet auf Beschleunigungs-Pfeil) eigentlich eine Beschleunigung? Die Kugel behält doch ihre Geschwindigkeit bei.
- Lehrer Woraus setzt sich die Geschwindigkeit zusammen?
- S 2 Aus Größe und Richtung.
- Lehrer Ja eben. Der Betrag bleibt gleich, aber die Richtung ändert sich.
- S 1 Ach ja!

Schüler 1 reagiert spontan: Der Körper bleibt auf der Kreisbahn doch gleich schnell; also, warum steht da eine Beschleunigung? (Beschleunigung verstanden

als Tempoerhöhung, vgl. Präkonzept 2). Auf die Nachfrage des Lehrers und die Antwort von Schüler 2 fällt ihm natürlich ein, daß die Geschwindigkeit auch mit der Richtung zusammenhängt. Das ist als Kenntnis vorhanden. Außerdem war der Punkt im Unterricht bereits mehrfach angesprochen worden. Der "eigentliche" Geschwindigkeitsbegriff als "Tempo" hat sich, zumindest bei Schüler 1, jedoch erhalten.

*

Bei Aufgabe B2 des Tests DAM (siehe B.2.2.2) ist ein v-t-Diagramm für eine eindimensionalen Bewegung zu zeichnen, deren Richtung sich zu einem bestimmten Zeitpunkt umkehrt. Der Aufgabe ist ein Koordinatenkreuz mit einer positiven und einer negativen Geschwindigkeitsachse beigelegt. Trotzdem nahmen nur 38% der Schüler in der Befragung 2 (N = 226) einen Vorzeichenwechsel vor. Der Prozentsatz lag in Grundkursen noch deutlich niedriger als in Leistungskursen (GK: 32%, N = 123; LK: 45%, N = 103).

*

Im dritten Beispiel fungiert das Präkonzept 1 verdeckt hinter einer bestimmten Betrachtungsweise des waagerechten Wurfs. Unterschiedliche Handhabungen des Begriffs Geschwindigkeit führten in einem Leistungskurs zu Kommunikationsschwierigkeiten der Schüler untereinander und mit dem Lehrer. Eine Gruppe von Schülern (Gruppe A) sah getrennt eine Bewegung in horizontaler und eine in vertikaler Richtung, aus denen sich der Wurf zusammensetzt. Es wurde der Vorschlag gemacht, die jeweiligen Geschwindigkeiten auf die Achsen eines Koordinatenkreuzes zu beziehen, in dem die Bahnkurve dargestellt werden sollte. Die andere Gruppe (B) dachte bei der "Geschwindigkeit der abgeschossenen Kugel" an deren jeweiliges Tempo. Eine Zerlegung der Geschwindigkeit in Komponenten faßten diese Schüler nicht ins Auge.

Von Gruppe A wurde die Frage aufgeworfen, ob die Horizontalgeschwindigkeit abnehme und dadurch die Vertikalbewegung immer stärker die Gesamtbewegung beeinflusse oder ob sie gleichbleibe. Für beide Standpunkte wurden Argumente vorgebracht, die der Lehrer so zusammenzufassen versuchte:

Lehrer Das wäre das eine Gegensatzpaar: Entweder man meint, die Bewegung bleibt gleichförmig oder sie wird langsamer.

Mit "die Bewegung" meint der Lehrer die Horizontalkomponente. Es meldet sich daraufhin ein Schüler aus Gruppe B zu Wort. Für das Verständnis der folgen-

den Passage muß man voraussetzen, daß Kai und Rolf bei "Geschwindigkeit" an den Betrag der Gesamtgeschwindigkeit denken.

Kai Ob die Bewegung gleichförmig bleibt oder langsamer wird - das haben wir ja so nicht gesagt. Das kann ja bei beiden Alternativen gleich sein. Ich finde, man müßte eher sagen, ob die waagerechte Bewegung abnimmt.

Lehrer Ja, das steht da doch. (Der Lehrer hatte die beiden Alternativen an die Tafel geschrieben.)

Kai Da steht "langsamer", aber das muß ja nicht sein.

Rolf "Langsamer" haben wir nicht gesagt, das ist doch etwas anderes.

Lehrer Ja, dann wiederholt noch einmal, was ihr gesagt habt - was ihr als Gegenposition aufbauen wolltet.

Rolf Ja, daß sie abnimmt, also schwächer wird. Aber deshalb kann die Kugel mit der gleichen Geschwindigkeit weiterfliegen.

Eine Zerlegung der "Bewegung" wird von Kai und Rolf akzeptiert. Aber damit geht keine Komponentenzerlegung der Geschwindigkeit einher: Die Geschwindigkeit ist die Schnelligkeit der Kugel und kann daher nur auf die Gesamtbewegung bezogen werden. Hierin liegt die Quelle der Verständigungsschwierigkeiten mit dem Lehrer, der an die Horizontalkomponente denkt.

Lehrer Damit kann ich nichts anfangen, mit der Aussage "die Bewegung wird schwächer". Ich stelle mir dann langsamer vor.

Kai Das würde dann doch bedeuten, daß die Geschwindigkeit - nehmen wir irgendeine bestimmte Zahl an - daß die Kugel mit einer bestimmten Zahl an Geschwindigkeit losfliegt und daß hinterher die Geschwindigkeit bei 0 angekommen ist.

Rolf Wenn die Kugel anfangs waagerecht ist und ab einem bestimmten Zeitpunkt von der Erdanziehungskraft angezogen wird, weil sie unten nicht mehr gehalten wird, dann ist die Strecke, die sie in jeder Zeiteinheit zurücklegt, gleich. Dabei ist es gleich, ob sie auf einer bestimmten Höhe ist oder eben weiter unten. Sie kann ja nach einer Sekunde hier sein und nach der nächsten Sekunde hier usw. (Der Schüler deutet dabei Punkte auf einer Bahnkurve an.)

S Das meinst du mit gleichförmig?

Rolf Ja.

"Gleichförmig" bedeutet für Rolf und Kai, daß die Kugel in gleichen Zeiträumen gleiche Wegabschnitte auf der Bahnkurve zurücklegt. Die jeweilige Richtung spielt gemäß dem Präkonzept 1 keine Rolle.

Widerstände gegen negative Geschwindigkeitswerte

Zu den Einwänden von Schülern gegen das Arbeiten mit negativen Geschwindigkeiten haben wir unter Punkt B.3.2.1.3 (Denkraumen 3 "Physik beschreibt ideale Laborwelten") bereits eine Fallstudie durchgeführt. Dort wurde die Problematik des Übergangs von lebensweltlichen Anschauungsgrößen zu physikalischen Rechen- oder Ersatzgrößen herausgearbeitet. Ein Hindernis beim Erwerb des Geschwindigkeitsbegriffs besteht darin, daß Schüler versuchen, der beibehaltenen Anschauungsgröße eine mathematische Formalisierung überzustülpen. Im gleichen Kurs, aus dem wir unter B.3.2.1.3 zitiert haben, kam es 10 Wochen später bei einer Aufgabe zum schiefen Wurf erneut zu einer Diskussion über negative Geschwindigkeitswerte. Wieder bezeichneten mehrere Schüler solche Angaben als "Quatsch", so etwas könne man sich nicht vorstellen.

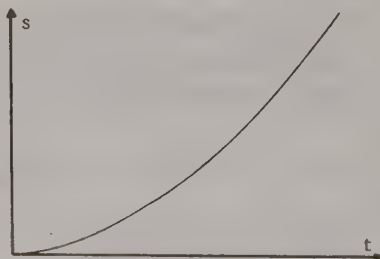
Auch aus anderen Kursen liegen Schüleraussagen vor, die sich gegen negative Geschwindigkeitswerte wenden. In der Regel gelingt es, die Bedeutung des Vorzeichens als Richtungsangabe bei linearen Bewegungen zu vermitteln. Das Minuszeichen bleibt aber oftmals ein Zusatz zur eigentlichen Geschwindigkeit ("Geschwindigkeit nach links/rechts"), statt mit dem Betrag zu verschmelzen.

*

Punkt- und Intervallgrößen, Momentangeschwindigkeit

Die Unterscheidung zwischen Punkt- und Intervallgrößen (Ort - Weg, Zeitpunkt - Zeitraum, Momentangeschwindigkeit - Geschwindigkeitsdifferenz) bereitet Schülern große Probleme bei der Verarbeitung kinematischer Formalismen. Sie drückt sich z.B. in der Verkürzung von Formeln aus: $v = \Delta s / \Delta t$ wird zu $v = s / t$. Zwischen den Größen Ort und Weg besteht nicht nur in Schüleraussagen Verwirrung. Das Verständnis wird dadurch erschwert, daß im Unterricht Beschleunigungen (Änderungen des Geschwindigkeitsbetrages) meist auf den Ausgangs- oder Endzustand der Ruhe bezogen werden.

Das erste Beispiel zeigt, wie sich eine fehlende Differenzierung zwischen Punkt- und Intervallgrößen auswirkt. Unterrichtsgegenstand ist die ungleichförmig beschleunigte Anfahrbewegung eines Autos, die in Form eines s-t-Diagramms vorliegt (siehe Graphik).



Der Protokollauschnitt dreht sich um die Ermittlung der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_1 . Von den Schülern kamen insgesamt 5 verschiedene Vorschläge:

- 1) s_1/t_1 (Detlev)
- 2) "Wie wir das gestern gemacht haben: $s_2 - s_1$ durch $t_2 - t_1$." (Lorenz kann seinen Vorschlag über die Angabe der Formel hinaus jedoch nicht erklären.)
- 3) $v(t_1)$ als Durchschnittsgeschwindigkeit im Intervall t_0 bis t_2 mittels $(s_2 - s_1)/(t_2 - t_1)$, mit $t_2 = 2 t_1$. (Andreas)
- 4) kleines Steigungsdreieck bei (t_1, s_1) einzeichnen. (Conrad)
- 5) "Wenn man die Formel $v = a \cdot t$ hat, kann man v bestimmen." (Detlev)

Wir greifen die Vorschläge 1 und 5 heraus, die beide von Detlev stammen. Sie sind rückführbar auf eine fehlende Differenzierung zwischen den Punktgrößen Ort und Zeitpunkt und den Intervallgrößen Weg und Zeitdifferenz. Dazu kommt ein Gutteil Formelgläubigkeit (vgl. Denkraumen 8 "Formelfixierung"). Detlev erinnert sich an die Formeln $v = s/t$ und $v = a \cdot t$. Diese verheißen auf den ersten Blick eine einfache Lösung für das gestellte Problem. Conrad hat gerade seinen Vorschlag 3 eingebracht, als sich Detlev meldet:

Detlev Man müßte die genaue Beschleunigung kennen.

Lehrer Ja, und wie kriegst du die?

Detlev Weiß ich nicht.

Lehrer Man kriegt die über die Geschwindigkeiten. Wir haben aber nur Weg und Zeit. - Noch was: Du willst die Gleichung $v = a \cdot t$ verwenden, nicht? Für was für eine Art von Bewegung gilt die?

Detlev Gleichmäßig beschleunigte.

Lehrer Ja genau. Und deswegen haut das hier nicht hin.

Detlev Aber wenn ich die Beschleunigung an dem Punkt habe?

Lehrer Aber die ändert sich doch immer.

Detlev Wir wollen doch nur die Geschwindigkeit an dem Punkt haben. Und wenn wir jetzt die Beschleunigung in diesem Punkt haben, dann kann ich doch auch die Geschwindigkeit ausrechnen.

Lehrer Aber nicht mit der Gleichung.

Detlev Warum nicht?

Lehrer Man würde bei der Rechnung so tun, als wenn das Auto immer dieselbe Beschleunigung hätte. Aber in Wirklichkeit hatte es ja früher eine größere Beschleunigung. Also ist es schneller als man nach der Formel berechnet.

Schüler (langes Schweigen)

Der Lehrer erklärt daraufhin an einem v - t -Diagramm, daß beim Anfahrvorgang keine gleichförmig beschleunigte Bewegung vorliegt.

Lehrer Ist das klar geworden?

Detlev Ich versteht schon, was Sie sagen wollen. Aber wenn ich nur den Punkt

habe, dann ist das doch eine bestimmte Beschleunigung, oder?

Lehrer Nehmen wir doch mal ein Zahlenbeispiel. (gibt Beschleunigungswerte vor: $a(0s-1s) = 5m/s^2$, $a(1-2) = 4m/s^2$, $a(2-3) = 3m/s^2$, usw.)

Wie schnell ist das Auto nach einer Sekunde?

Andreas 5

Lehrer Und nach 2 Sekunden - wieviel hat es da?

Arnim 8

Lehrer Nein, eben nicht. Das ist genau der Denkfehler dabei. Mike?

Mike 4

Lorenz 2

Lehrer Noch ein paar Zahlen? - In der ersten Sekunde beschleunigt es auf 5. In der zweiten Sekunde hat es nur noch die Beschleunigung $4m/s^2$.

Conrad Ich würde sagen 7.

Lehrer Wie kommst du darauf? Kannst du das mal erklären?

Conrad Ja, weil die Geschwindigkeit 5 ist am Ende von 1 erreicht. Dann kommt nochmal die Beschleunigung dazu. Das war 2 und damit gibt es -

Nicht allein Detlev, sondern auch Arnim und Mike verwenden die Formel $v = a \cdot t$ direkt zur Bestimmung von $v(t_1)$. Conrads Ansatz ist korrekt, er hat sich bei Δv_2 lediglich verrechnet. Wir überspringen einen Abschnitt im Protokoll. Detlev sieht darin ein, daß seine Idee zu Widersprüchen führt. Er gibt sich aber auch nicht mit dem Vorschlag Conrads zufrieden, die Geschwindigkeit mittels eines Steigungsdreiecks zu bestimmen (Vorschläge 3 und 4). Sein Einwand lautet, man könne so nicht den "tatsächlichen" Wert für v bestimmen, sondern nur Näherungswerte (was zunächst richtig ist). Im Gegensatz zu Mike kann Detlev sich einen Grenzwert von $\Delta s / \Delta t$ nicht vorstellen:

Lehrer Zurück zu dem Problem: Wie kann man genau die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_1 kriegen? Oder kann man das gar nicht?

Detlev Kann man gar nicht.

Rolf In der Physik ist alles möglich.

Lehrer Wir haben jetzt eine Durchschnittsgeschwindigkeit im Intervall zwischen t_0 und t_2 . (siehe Vorschlag 3)

Mike t_0 und t_2 immer näher ranrücken.

Detlev Aber das wird nie genau.

Lehrer Wieso nicht?

Detlev Da müßte die Durchschnittsgeschwindigkeit ja Null sein.

Lehrer Hat ein Auto keine Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt?

Schüler (allgemeine Zustimmung) ... doch ... klar ...

Lehrer Aber Detlev sagt, genau geht das nicht.

Detlev Wenn das genau sein soll, müßte ja Δs Null sein. Und das geht dann nicht.

Mike Aber man kann die Geschwindigkeit beliebig genau annähern.

Detlev Aber genau ist das nicht. Man kann das nicht genau ausrechnen - weil, wenn das genau sein soll, dann müßte es ja Null sein. Ungenau kann man die ausrechnen.

Mathematisch verschmilzt das geometrische Verhältnis $\Delta s/\Delta t$ im Grenzübergang $\Delta t \rightarrow 0$ zur eigenständigen Größe Momentangeschwindigkeit. Man kann zwar empirisch nur über endliche Intervalle Δs und Δt die Größe v bestimmen, gedanklich ist der Prozeß aber so weit zu treiben, daß man einen Zeitpunkt erreicht. Detlev hat diesen gedanklichen Schritt noch nicht vollzogen. Er verbleibt bei kleinen, aber noch endlichen Deltas: "Aber das wird doch nie genau". Im Alltagsdenken ist der Übergang von beliebig kleinen Zeitintervallen zu geometrischen Zeitpunkten kein Thema. Auch ein "Moment" hat im Zweifelsfall eine zeitliche Dauer. Die Formalisierung des Begriffs der Momentangeschwindigkeit führt zu einem Problem, das im Anschauungsbegriff Schnelligkeit nicht auftaucht: Ein Körper "hat" eine Geschwindigkeit als Eigenschaft; sie besteht unabhängig von der Möglichkeit ihrer exakten Bestimmung.

Man kann das Problem des Grenzübergangs, wie es der Lehrer im vorliegenden Unterricht tat, am Xenon-Paradoxon veranschaulichen, das mathematikgeschichtlich eine große Bedeutung hatte: Ein Läufer kann eine Schildkröte, die mit einem Vorsprung gestartet ist, nie einholen, weil die Schildkröte immer dann, wenn der Läufer den Ort erreicht hat, an dem sie zu einem kurz vorher liegenden Zeitpunkt gewesen war, sich davon bereits wieder um eine kleine Strecke entfernt hat. Übrigens vertrat Detlev die Ansicht, daß, wenn man das Paradoxon ernst nimmt, die Wegdifferenz zwischen Läufer und Schildkröte nicht Null werden könne.

*

Zum Problem mangelnder Differenzierung von Punkt- und Intervallgrößen, gekoppelt mit dem Denkraum der Formelfixierung, wollen wir ein weiteres Beispiel aus einem anderen Kurs anführen. Es geht wieder um die Bestimmung der Geschwindigkeit zu einem Zeitpunkt - diesmal bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung. Die Schüler erkannten schnell, daß aus Orts-Zeit-Differenzen nur Durchschnittsgeschwindigkeiten ermittelbar sind. Verschiedene Schüler bezeichneten das als unbefriedigend. In dieser Situation meldete sich Oswald mit einem Vorschlag zu Wort, der für eine längere Diskussion sorgte:

Oswald Es ist die Frage, was wir haben wollen. Wollen wir jetzt die genaue Geschwindigkeit zu einer genauen Zeit haben, z.B. für t_1 , so können wir diese genau bestimmen. Suchen wir jedoch die Durchschnittsgeschwindigkeit, dann müssen wir für jeden Punkt messen und alles durcheinander teilen.

Lehrer Also, ich habe nichts dagegen, daß wir jetzt zur Bestimmung der Momentangeschwindigkeit kommen. Es hat mich nur ein wenig überrascht, daß du gesagt hast, wenn wir die Momentangeschwindigkeit zu t_1 haben wollen, dann können wir sie ja ganz einfach ausrechnen. Wie würdest du das denn machen?

Oswald Einfach s durch t teilen. Das gilt dann aber nur für einen Punkt.

Oswald stellt das Problem der Ermittlung von Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeiten auf den Kopf. Nach seinem Ansatz kann man mittels $v(t_1) = s(t_1)/t_1$ die jeweilige Momentangeschwindigkeit einfach berechnen, während die Bestimmung der Durchschnittsgeschwindigkeit über das arithmetische Mittel von Momentangeschwindigkeiten zu erfolgen hat. Oswald macht eine explizite Unterscheidung zwischen Zeitpunkten und Zeitintervallen, erkennt aber nicht, daß er in der Beziehung $v = s/t$ mit Intervallgrößen arbeiten muß.

Dem Vorschlag von Oswald schließt sich eine längere Diskussion an, in der Tom und Ulf Oswald darauf hinzuweisen versuchen, daß er bei $v_1 = s_1/t_1$ nur eine Durchschnittsgeschwindigkeit im Intervall $t = 0$ bis $t = t_1$ berechnet. Oswald versteht diese Einwände nicht. Er ist überzeugt, daß sein Vorschlag einen genauen Wert für $v(t_1)$ ergibt und keine Durchschnittswerte. Wir zitieren aus seinen Er widerungen:

Oswald Ich berechne ja nur einen Punkt, das ist was anderes als das, was Ulf eben gesagt hat; er meint nämlich die Kurve. Berechne ich aber einen Punkt, dann ist es egal, ob dieser auf einer Kurve oder auf einer Geraden liegt. Der Punkt ist zwar unheimlich klein, aber in diesem Punkt herrscht die gesuchte Geschwindigkeit. Das hat nichts mit Durchschnittsgeschwindigkeit zu tun. Das ist eigentlich eine Momentangeschwindigkeit.

(...)

Oliver Ich möchte Tom noch sagen, daß er Quatsch erzählt hat. Wenn ich nur einen Punkt habe, dann kann ich auch keine Durchschnittsgeschwindigkeit haben. Wenn ich Durchschnittswerte meine, dann kann dies ja wohl nur von mehreren Punkten sein.

*

Interpretation von "Moment"

In einer Nebenerhebung wurden Erstsemester-Studenten der Physik zum zeitlichen Verlauf von Geschwindigkeit und Beschleunigung bei der Bewegung eines Fadenpendels befragt. Vorher waren im Praktikum Orts-Zeit-Aufzeichnungen des Bewe-

gungsverlaufs gemacht und durch numerisches Differenzieren daraus $v(t)$ - und $a(t)$ -Kurven ermittelt und graphisch dargestellt worden. (Bei einer Pendellänge von rund 2,5m und kleinen Auslenkungen konnte die Bewegung näherungsweise als eindimensional betrachtet werden.) Zur Geschwindigkeit in den Umkehrpunkten der Pendelbewegung meinte die Mehrzahl der 7 befragten Studenten, das Pendel stehe einen "Augenblick lang" still. Es sei nur ein ganz kurzer "Moment", und man könne seine Dauer nicht in Sekundenbruchteilen abschätzen. Des weiteren wurde angenommen, daß die Beschleunigung in den Umkehrpunkten Null sein müsse, da der Körper ja einen "Moment lang" stillstehe. Darin drückt sich die gedankliche Verbindung von großer Beschleunigung mit großer Geschwindigkeit, statt großer Geschwindigkeitsänderung aus (siehe Präkonzept 2). Verweise auf die angefertigten $v(t)$ - und $a(t)$ -Diagramme, die zeigten, daß die Beschleunigung in den Umkehrpunkten ihren Maximalbetrag erreicht, bewirkten eher eine gewisse Ratlosigkeit als ein Umdenken.

B.3.3.1.3

Präkonzept 2: Beschleunigung als Bilanzgröße

P2: Beschleunigung ist die Erhöhung des Geschwindigkeitsbetrages. Große Tempoänderungen sind ein Zeichen für große Beschleunigungen.

Grobstruktur des Vorverständniselements

Beschleunigung bedeutet im Alltagsgebrauch das Schnellerwerden eines Körpers. Primär wird, physikalisch gesprochen, die Zunahme des Geschwindigkeitsbetrages betrachtet. Diese bilanziert den Beschleunigungsvorgang. Der Zeitraum, in dem die Beschleunigung stattfindet, ist eine zusätzliche Angabe, die z.B. bei Vergleichen der Motorstärken von Autos anzugeben ist: "Der Wagen beschleunigt von 0 auf 100 in 8,5 Sekunden." Beschleunigung ist demnach keine auf den zeitlichen Verlauf des Vorgangs bezogene Größe, sondern eine Bilanzgröße, die aus dem Vergleich von Anfangs- und Endzustand ermittelt wird. Daher ist verständlich, daß mit einer großen Beschleunigung eher das Erreichen großer Endgeschwindigkeiten assoziiert wird als eine starke zeitliche Änderung, die auch bei kleinen Differenzen kleiner Absolutbeträge auftreten kann.

Vieles, was zur Grobstruktur des Präkonzepts 1 (Geschwindigkeit) bezüglich Vektorcharakter und Eigenständigkeit als Verhältnisgröße gesagt wurde, gilt sinngemäß auch für den Beschleunigungsbegriff. Negative Werte bei linearen, horizontalen Bewegungen stoßen allerdings auf weniger Skepsis als negative Geschwindigkeiten, weil sie als Bremsen interpretiert werden können. Bei Vertikalbewegungen fällt es Schülern schwer, sich vorzustellen, daß ein nach oben geworfener Körper beim Auf- und beim Abstieg eine nach Betrag und Richtung gleiche Beschleunigung erfährt, obwohl seine "Geschwindigkeit" (= Tempo) zunächst ab- und anschließend wieder zunimmt. Die zeitweise Gegenläufigkeit von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsrichtung ist eines der Probleme beim Verständnis der Kraftbilanz für das Maxwellsche-Rad (Jo-Jo) (Ergebnis einer Nebenerhebung an Physik-Erstsemestern).

Gleichmäßigen Kreisbewegungen wird von Schülern meist eine konstante Geschwindigkeit zugeordnet. Aber auch bei Erkennen der ständigen Geschwindigkeitsänderung besteht kein unmittelbarer Anlaß, daraus auf eine Beschleunigung zu schließen, da Richtungsänderungen gemäß Präkonzept 2 nicht als Beschleunigung konzeptualisiert werden.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Beschleunigung als Bilanzgröße

Die Angabe einer Beschleunigung beschreibt für Schüler bei Fungieren des Präkonzepts 2 die Zunahme oder, etwas differenzierter, die Änderung des Tempos eines Körpers. Die Zeit geht allenfalls als sekundärer Faktor ein, und zwar als Zeitraum, in dem die Beschleunigung/Bremsung stattgefunden hat. Es erscheint Schülers obskur, einem Zeitpunkt eine Beschleunigung zuzuordnen. Die Beschleunigung bilanziert einen Prozeß über einen Vergleich von Anfangs- und Endzustand, ausgedrückt durch die jeweiligen Geschwindigkeiten.

Die folgenden Einzelzitate stammen aus einer Einführungsstunde zum Beschleunigungsbegriff:

Lehrer Beschleunigung - was verstehen wir darunter?

Ralf Wenn ein Gegenstand schneller wird. Wenn seine Geschwindigkeit sich ändert.

Albert Der Beschleunigungsprozeß ist ein einmaliger Vorgang. Von daher, finde ich, müßte man eine Größe finden, wodurch man mit einer Zahl einen einmaligen Vorgang bestimmen kann. Es ist günstig, wenn man einen Wert hat, um den Vorgang beschreiben zu können.

Ralf Wenn der Wagen auf Null steht, hat er keine Geschwindigkeit, und er braucht auch vielleicht mehr Kraft - also mehr Zeit - um auf auf 1 Meter pro Sekunde zu kommen. Aber ich würde sagen, die Beschleunigung ist dieselbe, wenn er schon 7 Meter pro Sekunde hat und auf 8 Meter pro Sekunde beschleunigt wird. Dann braucht er weniger Zeit, aber die Beschleunigung ist für mich dieselbe.

Es ist selten, daß ein Schüler, wie oben Ralf, explizit den Zeitraum, in dem die Geschwindigkeitsänderung stattfindet, als unerheblich bezeichnet. Das Präkonzept 3 bewirkt eher, daß Schüler auf den Zeitraum nicht eingehen, da sie primär an die Tempodifferenz denken.

Wir wollen nicht versäumen, aus der gleichen Stunde zwei Äußerungen zu zitieren, in denen Schüler die Tempoänderungen auf Zeiträume beziehen:

Frank Wenn der Körper in einem bestimmten Zeitraum immer soundso viel schneller wird, müßte die Beschleunigung konstant sein.

Falk Ich glaube, ich habe hier einen besonders guten Wert für die Beschleunigung, weil die Geschwindigkeit in 1/10 Sekunde immer genau um 0,1 Meter in der Sekunde ansteigt.

*

In einem Schülerprotokoll über Stoßexperimente standen die folgenden Ausführungen, in denen Beschleunigung im Sinne von Tempodifferenz verwendet wird:

"Ich nehme an, daß der schwere Wagen mehr Energie "speichern" kann als der leichte Wagen, weil der den stillstehenden leichten Wagen stark beschleunigt hat und selber weitergefahren ist, während der leichtere Wagen den schweren Wagen, als der stillstand, nicht so stark beschleunigt hat und zurückgeprallt ist."

*

Einführung der Beschleunigung - Eine Fallstudie

Wir geben eine Einführungsstunde zum Beschleunigungsbegriff wieder, die einige typische Schritte des Zugangs von Schülern auf die Größe aufzeigt.

Lehrer Wir hatten am Freitag die Geschwindigkeit von diesen Fahrbahnversuchen aufgezeichnet und versucht, damit die Bewegung zu beschreiben. Was für eine Bewegung ist das, wenn ein Wagen eine schiefe Ebene runterrollt?

Markus Das ist eine gleichförmig beschleunigte Bewegung.

Lehrer Was ist denn das?

Markus Also - der Wagen beschleunigt.

Lehrer Was heißt denn Beschleunigung? Was ist Beschleunigung?

Rainer Das Schnellerwerden eines Körpers.

Als erster Einfall kommt verständlicherweise das Schnellerwerden als primäres Kennzeichen einer Beschleunigung. Häufig verwenden Schüler aktive Formulierungen: "Der Wagen beschleunigt." Es handelt sich um eine Übertragung des Aktivitätsschemas (vgl. Denkraum 6), das zunächst an "aktiven" Körpern, wie Menschen oder Autos (aktiver Teil: Motor), entwickelt wird, auf beliebige Körper.

Die Aufforderung des Lehrers, den Begriff präziser zu fassen, führt zur Einbringung der Einheit.

Lehrer Kann man das irgendwie handfest machen?

Thorsten Meter durch Sekunde zum Quadrat.

Lehrer Meter durch Sekunde zum Quadrat - Was ist das schon wieder?

Thorsten Beschleunigung.

Lehrer Hm, kann jemand was damit anfangen?

S Nichts kann man damit anfangen.

Lehrer Thorsten, kannst du das mal näher erläutern?

Thorsten (schweigt, weiß offenbar keine Antwort)

Lehrer Rainer hat gesagt: "Schnellerwerden eines Körpers". Wie kann man das irgendwie strenger formulieren?

Thorsten Geschwindigkeitszunahme.

Von den Schülern kommt kein Vorschlag, die Zeit in die Umschreibung der

Beschleunigung einzubeziehen (obwohl in der Einheit Sekunden vorkommen). Beschleunigung ist primär Tempozunahme. Der Lehrer versucht, durch ein Beispiel aus dem Alltag einen Anstoß zur Berücksichtigung der Zeit zu geben.

Lehrer Und wenn man jetzt zwei Autos vergleicht? Beide stehen irgendwo an einer Ampel und fahren nachher 100. Die Geschwindigkeitszunahme ist bei beiden dann also -?

Peter 100.

Lehrer Ja, 100 Kilometer pro Stunde. Beschleunigen die dann beide auch gleich schnell?

Ludwig Das ist nicht gesagt, ob die gleich schnell beschleunigen.

Lehrer Sondern? Wovon hängt das denn ab?

Ludwig Von der Kraft, mit der sie anfahren.

Arnim Der eine trödelt ganz langsam los und der andere viel schneller.

Bevor die Zeit genannt wird, kommt Ludwig auf den Aspekt der Kraft, "mit der" die Autos anfahren. Die Frage "Wovon hängt das ab?" wird kausal verstanden (vgl. das spezifische Interesse I an der Dynamik von Bewegungen). Der Lehrer muß nochmals nachfragen:

Lehrer Und wie kann man dann sagen, die Beschleunigung ist soundso groß beim einen und so beim anderen. Wovon hängt das ab, wenn man das beschreiben will?

Bernd Ich würde sagen von der Zeit. Wieviel Zeit der braucht, um die Geschwindigkeit von 100 zu erreichen. Und die Kraft, die da gebraucht wird, um so schnell zu fahren.

Lehrer Wenn man jetzt absieht von der Ursache, warum der so schnell beschleunigen kann - was bleibt da nun übrig als entscheidende Größe?

Bernd Die Zeit.

Rainer Die Zeit und der Weg. Also, die Zeit, die der Wagen braucht, um einen bestimmten Weg zurückzulegen. Also, die Zeit, die das Fahrzeug braucht, um auf einem bestimmten Weg eine bestimmte Geschwindigkeit zu erreichen.

Die Zeit ist als Parameter eingebracht. Daß die Zeit häufig nur eine ergänzende Angabe zur Beschleunigung als Tempodifferenz ist, zeigt sich darin, daß neben der Zeit von Schülern in solchen Diskussionen gleichzeitig der Weg angesprochen wird, auf dem die Tempoänderung erfolgt. Wenn man neben der Geschwindigkeitszunahme selbst noch eine andere Größe braucht, um Beschleunigungen ausdrücken zu können, warum sollte das nicht der Weg sein? Kern der Beschleunigung ist die Tempodifferenz. Weg oder Zeit erhalten die Rolle eines Hilfsparameters.

Arnim Der Weg ist da, glaube ich, überflüssig. Ich würde sagen: Beschleunigung ist Geschwindigkeitszunahme pro Zeit. Das heißt, wenn die Geschwindigkeit in sehr kurzer Zeit stark zunimmt, dann ist auch die Beschleunigung groß.

Lehrer Du meinst also Geschwindigkeitszunahme pro Zeit. Wenn man das mathematisch formuliert, ist das $a = \Delta v / \Delta t$ (schreibt das an die Tafel). Das soll die Beschleunigung sein, Abkürzung "a".

S 1 Ich dachte Geschwindigkeitszunahme wäre Beschleunigung.

Lehrer Das haben wir versucht am Beispiel mit den Autos zu klären. Nehmen wir einen Porsche und einen R4, die fahren beide 100, welcher beschleunigt aber schneller?

S 1 Der Porsche.

Lehrer Der Porsche. Also, wenn du ein flottes Auto haben willst, ist das schon entscheidend, wie schnell er das hinkriegt.

Rainer Ja, und von daher glaube ich auch, daß der Weg da irgendeine Rolle spielt. Der Porsche braucht einen kürzeren Weg als der R4.

Arnim hat die Zeit in seinen Beschleunigungsbegriff integriert. Das zeigt sich darin, daß er einen kleinen Beschleunigungszeitraum mit einem großen Beschleunigungsbetrag in Beziehung setzt. Für Schüler 1 und Rainer ist Beschleunigung wesentlich Geschwindigkeitszunahme. Das Beispiel mit Porsche und R4 macht plausibel, daß man für den Vergleich der "Beschleunigungsstärken" einen Hilfsparameter braucht. Betrachtet man Beschleunigung als Bilanzgröße für den abgeschlossenen Vorgang der Temposteigerung, so kann der Vergleich der Beschleunigungsstärke (Intensität der Beschleunigung) auch anhand des Weges angestellt werden, auf dem die Temposteigerung erfolgt.

Im Unterricht wurden anschließend die alternativen Festlegungen $a = \Delta v / \Delta t$ und $a = \Delta v / \Delta s$ eingehend besprochen. Bei der Einführung des Beschleunigungsbegriffs muß man damit rechnen, daß die Schüler auch die zweite Festlegung für möglich halten. Eine stichhaltige Gegenargumentation, durch Aufzeigen paradoxer Folgerungen aus der Definition, ist nicht leicht zu führen. Die Galileische "Widerlegung", die von Pukies (1979, 142) aufgegriffen wurde, hat selbst ihre Mängel (siehe dazu Seite 425f). Nach unseren Eindrücken aus zwei Kursen, in denen die beiden Definitionen ausführlich vergleichend diskutiert wurden, trug das eher zu einer Verwirrung als zur Klärung des Beschleunigungsbegriffs bei. Da es sich bei der Festlegung $a = \Delta v / \Delta s$ nicht selbst um ein Vorverständniselement handelt, sondern um eine durch Unterricht (z.B. Lehrerfragen nach Möglichkeiten des Vergleichs von Beschleunigungen) stimulierte Formalaussage, sollte man für die "Widerlegung" nicht zuviel Zeit aufwenden.

Es erscheint uns angemessener, die anerkannte Beschleunigungsdefinition dadurch zu begründen, daß sie eine einfache Formulierung kinematischer und dynamischer Zusammenhänge ermöglicht (was bei $a = \Delta v / \Delta s$ nicht gegeben ist) und sie sich dadurch in der Theorie der Mechanik bewährt hat. Insbesondere kann man für den Spezialfall der zeitlich konstanten Beschleunigung einfache paradigmatische

Beispiele konstruieren. Dieser Grundgedanke entspricht Galileis Entwicklung der Kinematik in den 'Discorsi', die wir unter Punkt D.3.4 nachgezeichnet haben.

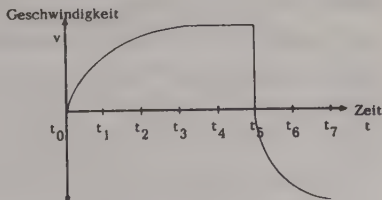
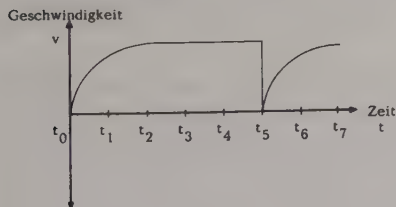
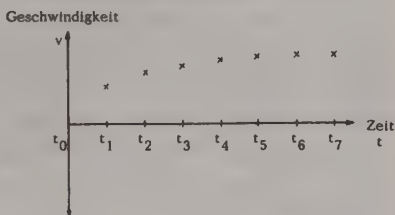
*

"Beschleunigungsvorrat"

Die Auswertung der Denkaufgabe B2 (Test DAM; siehe B.2.2.2) ergab, daß 43% der Schüler, bei denen davon ausgegangen werden kann, daß keine Verwechslung mit einem s-t-Diagramm vorliegt (N = 226), den Anstieg des Graphen im v-t-Diagramm deutlich über den Zeitpunkt t_1 hinaus verlängert haben, teilweise bis hin zum Zeitpunkt t_5 .

Wir haben dieses Ergebnis schon einmal beim Denkrahen D9 (Analogiedenken, siehe B.3.2.2.5) diskutiert. Es ist auch für das Verständnis der Beschleunigung selbst bedeutsam. Das Ende der Beschleunigungsphase fällt bei 43% der Schüler nicht mit dem Abbruch des Kontakts zwischen Stahlkugel und Feder-Schußapparat zusammen. Daß dies nicht auf zeichnerische Unachtsamkeit zurückgeht, ist dadurch gesichert, daß nur solche Fälle gezählt wurden, in denen der Anstieg der Kurve mindestens bis t_2 erfolgte.

Nicht selten ging der Anstieg bis t_7 . In einigen Diagrammen war vor dem Zeichnen einer durchgezogenen Kurve (oder statt derer) eine Punktfolge eingetragen worden. Auf anderen Blättern stand " $v \sim t$ ". Drei typische Beispiele sind angeführt.



Offenbar sehen diese Schüler die Kugel mit einer Art "Beschleunigungsvorrat" ausgestattet. Die Feder verleiht dem Körper Kraft/Energie/Schwung (vgl. Präkonzept 4: Clusterbegriff 'Kraft'), die/der sich nach und nach in Tempo umsetzt. Der Körper "beschleunigt" aus sich heraus weiter, auch wenn die Feder keine äußere Kraft mehr auf ihn ausübt. Historische Parallelen werden unter Punkt D.2.2 aufgezeigt.

B.3.3.2

Bereich 2: Dynamik

B.3.3.2.1 Präkonzept 3: Kraft als allgemeine Wirkungsfähigkeit

P3: Alle mechanischen Vorgänge (In-Bewegung-Setzen, Bewegung, Bewegungsänderung, Verformung) erfolgen unter dem Einfluß von Kräften. Körper können Kraft haben, Kraft ausüben, eine Kraft erfahren, Kraft speichern, Kraft verbrauchen usw. Kräfte sind die bestimmenden Antriebe für alle Veränderungen in den Konfigurationen der materiellen Dinge.

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

'Kraft' bleibt bei vielen Schülern auch nach Einführung des Newtonschen Kraftbegriffs ein universelles Beschreibungs- und Erklärungsschema für mechanische Vorgänge (und nicht nur dafür). Als Clusterbegriff hat 'Kraft' eine Vielzahl von Bedeutungen, die sich erst im jeweiligen Verwendungskontext ausschärfen. Der gemeinsame Kern dieser Bedeutungen liegt im Ausdruck einer allgemeinen Wirkungsfähigkeit. Die physikalischen Begriffe kinetische und potentielle Energie, Kraft und Kraftstoß korrespondieren mit wichtigen Aspekten des Clusterbegriffs. Dazu kommen umgangssprachliche Termini wie Wucht, Schwung, Stärke. Schaut man im "Deutschen Wortschatz" nach (Wehrle-Eggers 1967), so findet man unter dem Stichwort "Kraft" die folgende Bedeutungsskala: Stärke, Potenz, Macht, Gewalt, Energie, Potential, Tüchtigkeit, Arbeitskraft, Mut, Vermögen, Wirkungskraft, Fähigkeit; und unter den Adjektiven: kräftig, stark, energiegeladen, dynamisch, wirkungsvoll. Eine weitgehend deckungsgleiche Skala findet sich zum Stichwort "Wirkkraft", auf das im systematischen Teil unter dem Suchwort "Energie" verwiesen wird. "Kraft" und "Energie" sind zwei Namen (Begriffswörter) für den gleichen Clusterbegriff. "Wirkkraft" oder "Wirkungsfähigkeit" umschreiben seinen Gehalt am treffendsten.

Andere Clusterbegriffe mit Bedeutung für den Lehr-/Lernprozeß in der Physik sind 'Strom' und 'Wärme'. Clusterbegriffe haben keine expliziten Definitionen oder fest umrissenen Anwendungsbereiche. Sie tragen die generellen Charakteristika von Alltagsbegriffen, die wir unter Punkt B.3.2.1 beschrieben haben (Stichwort "Indexikalität"). Konstruieren wir ein Beispiel dafür, wie sich im Alltag aus dem Verwendungskontext die jeweilige konkrete Bedeutung von 'Kraft' erschließt:

Nach einem 3000m-Hindernislauf bekennt ein Sportler: "Das Rennen hat mich viel Kraft gekostet." Sein Trainer wird ihm daraufhin vielleicht Traubenzucker verabreichen, um den Energieverbrauch auszugleichen. (Wir lassen

physiologische Aspekte außer acht.) Derselbe Sportler muß beim Verlassen des Stadions feststellen, daß seine Autobatterie leer ist. Da es ihm nicht gelingt, seinen Wagen anzuschieben, wendet er sich an seinen zufällig vorbeikommenden Trainer: "Schieb mal mit an. Ich hab' nicht genug Kraft." Sein Betreuer wird ihm nicht erneut Traubenzucker anbieten, sondern beim Schieben helfen, denn er versteht, daß nicht, wie im ersten Fall, Mangel an Arbeitsfähigkeit herrscht, sondern ein Mangel an Körperstärke.

In unserem Beispiel funktioniert die Kommunikation, obwohl der gleiche Begriff in zwei unterschiedlichen Bedeutungsfacetten auftritt. Die konkrete Bedeutung hat sich im Verwendungskontext ausgeschärft. In der Physik sind Begriffe auf andere Weise mit Bedeutungsinhalten gefüllt und werden anders verwendet. Der Clusterbegriff 'Kraft' ist in ein System distinkter Einzelbegriffe aufgegliedert, die per Definition voneinander abgegrenzt und miteinander verknüpft werden. Die Bedeutung eines physikalischen Begriffs ist unabhängig von der Teilhabe an einer bestimmten Kommunikationssituation intersubjektiv gesichert. Jedem Begriff ist ein sprachliches Zeichen (Begriffswort) fest zugeordnet. Bei Spezifizierungen physikalischer Begriffe - z.B. Kraft in elektrostatische Kraft oder Gravitationskraft - bleibt die Bedeutung des Basisbegriffs erhalten.

Diese Beschreibung des Charakters physikalischer Begriffe betrifft ein Stadium, in dem für einen Phänomenbereich eine abgeschlossene Theorie vorliegt. In deren Entwicklungsphase ist das Begriffssystem im Fluß. Es werden gleiche Termini in unterschiedlichen Bedeutungen verwendet und gleiche Konzepte mit unterschiedlichen Worten benannt. Wir zeigen das am Kraftbegriff historisch auf (siehe Punkt D.4). Es besteht jedoch das Ziel, diesen Zustand zu überwinden. Darin unterscheidet sich die Situation vom Alltagsdiskurs, der durch die Vagheit der Begriffe in ihren allgemeinen Bedeutungen befördert wird, so daß kein Anlaß besteht, sich um genaue Definitionen von Begriffsinhalten zu bemühen.

Es ist ein langer Prozeß, bis Schüler die physikalischen Begriffe Kraft und Energie von 'Kraft' in seiner Clusterbedeutung als allgemeiner Wirkungsfähigkeit abgrenzen. Mit der Einführung des Newtonschen Kraftbegriffs wird dieser Prozeß allenfalls eingeleitet. Die vorliegenden empirischen Daten zeigen, daß das übergeordnete universelle Erklärungsschema 'Kraft' bestehenbleibt, auch wenn Schüler wesentliche Elemente des Newtonschen Begriffs verarbeitet haben. Für Schüler ist eine Verwendung von 'Kraft' in anderen Bedeutungsfacetten als der newtonschen nicht bereits dadurch ausgeschlossen, daß eine Definition festgehalten wurde. Wenn Schüler davon sprechen, ein bewegter Körper "habe" Kraft, dann nehmen sie nicht in Anspruch, Kraft im newtonschen Sinne zu gebrauchen. Sie

verwenden lediglich ein Wort, das als Begriffswort auch für einen definierten physikalischen Begriff steht. Man darf daraus noch nicht schließen, der physikalische Begriff sei nicht verstanden worden. Die Schüler haben sich vielmehr noch nicht auf die allgemeinen Prinzipien der Physik für den Umgang mit Begriffen eingestellt. Die newtonsche Bedeutung kann als neue Facette in das Cluster eingehen, ohne dadurch andere Bedeutungen auszugrenzen.

Das Wesentliche am Clusterbegriff 'Kraft' besteht darin, daß Schüler nicht etwa dasselbe Wort zur Bezeichnung von Begriffen verwenden, die von ihnen inhaltlich voneinander abgegrenzt werden, sondern daß sie mit 'Kraft' ('Energie') ein ganzes Feld von Bedeutungen gemeinsam abdecken. Schüler machen Fallunterscheidungen zwischen 'Kraft' und 'Energie', wenn wir sie im Physikunterricht dazu anhalten. Teilweise werden die jeweiligen 'Kräfte' durch Zusätze gekennzeichnet: "Kraft der Bewegung"/"Bewegungsenergie", "Aufprallkraft". Es handelt sich dabei jedoch um Differenzierungen von etwas prinzipiell Gleichem. "Bewegungsenergie" kann z.B. beim Stoß als "Aufprallkraft" wirksam werden. Eine "beschleunigende Kraft" kann als "Bewegungsenergie" gespeichert werden. Ein Schüler brachte die Betrachtungsweise von Kraft/Energie/Schwung/... als Facetten einer universellen Wirkungsfähigkeit auf den Punkt, als er auf die Frage, welchen Sinn er in der von der Physik betonten Trennung zwischen Kraft und Energie sehe, schrieb: "Das ist notwendig, denn schließlich sind es ja verschiedene Kräfte."

Unabhängig davon lernen die meisten Schüler, in Standardsituationen im Unterricht oder in Klausuren die richtigen Formeln für Kraft, Energie oder Impuls zu assoziieren und anzuwenden.

In den Präkonzepten P3-1 bis P3-3 werden die physikalisch wichtigsten Facetten des Clusterbegriffs 'Kraft' erläutert. In der Diskussion des Präkonzepts 3 sind Belege angeführt, die den Clusterbegriff generell kennzeichnen.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Schüler zur Notwendigkeit der Unterscheidung zwischen Kraft und Energie

Im Test MdP der Befragung 2 (siehe B.2.2.2) wurde die Frage gestellt:

Die Physik trennt scharf zwischen den Begriffen Kraft, Energie und Impuls. Halten Sie die Unterscheidungen für notwendig oder für eine unnötige Verkomplizierung ähnlicher Dinge? Begründen Sie Ihre Antwort!

89% der antwortenden Schüler (N = 184) bezeichneten die Begriffsunterscheidungen als notwendig, nur 5% als unnötig, der Rest war geteilter Meinung. Die

Zustimmung lag in Leistungskursen bei 93% ($N = 81$), in Grundkursen betrug sie 86% ($N = 103$). In Grundkursen sprachen sich 9 Schüler ausdrücklich gegen eine scharfe Begriffstrennung aus, in Leistungskursen nur einer.

Beginnen wir mit einigen Antworten, in denen die Differenzierung als unnötig bezeichnet wird. Begründet wurde eine Ablehnung überwiegend mit dem Argument, die Unterscheidung sei verwirrend und für das tägliche Leben bedeutungslos.

"Ich halte es für eine Verkomplizierung. Oftmals spricht man im normalen Leben von Kräften, die nach der Physiklehre als Energie herausgestellt werden. Der Unterschied ist oft sehr gering und erschwert die Definition solcher Dinge."

"Ich halte diese Trennung für nicht notwendig, da die Schüler oft diese drei Begriffe durcheinanderbekommen. Die Trennung ist schon zu exakt, fast schon abstrakt."

"Es ist meiner Meinung nach eine unnötige Verkomplizierung ähnlicher Dinge, denn man kann es im täglichen Leben doch nicht anwenden."

Auch manche Schüler, die sich für die Trennung aussprachen, bezeichneten sie als verwirrend und schwer verständlich.

Die wichtigsten Begründungen für eine Zustimmung lauteten:

- 1) In der Physik muß alles gründlich definiert werden.
- 2) Wenn man nicht zwischen Kraft, Energie und Impuls trennen würde, wüßte man nicht, welche Formel anzuwenden ist.
- 3) Man muß unterscheiden, weil es sich um unterschiedliche Dinge handelt.

Beispiele für den Begründungstyp 1:

"Es ist nötig. Physik muß klar definiert werden. Es muß Ordnung herrschen."

"Insgesamt gehören die drei Begriffe zusammen. Es ist keine Verkomplizierung ähnlicher Dinge, denn in der Physik ist man genau, und so trennt man auch zwischen noch so eng beieinanderliegenden Dingen."

Beispiele für Typ 2:

"Es ist notwendig, da Kraft, Energie usw. mit Formeln definiert sind und damit gerechnet wird. Um die richtige Formel zu nehmen, muß man genau wissen, was Kraft, Energie usw. bedeutet. Wenn z.B. der Lehrer nach Energie fragt, kann man schlecht die Formel für Kraft anwenden, nur weil es scheinbar ähnliche Dinge sind."

"Diese Unterscheidung ist notwendig, da alle drei Sachen unterschiedliche Einheiten haben. Es ist genauso eine Unterscheidung wie zwischen m und m^2 bzw. m^3 . Sie kompliziert das Ganze ein wenig, ist aber notwendig."

"Es ist notwendig, da diese Dinge, die im Grunde dieselben Sachen sind, ganz andere Gleichungen besitzen. Sie sind aber nur im Grunde dasselbe."

Man erkennt aus einigen der zitierten Antworten, daß die Zustimmung zur

Begriffstrennung keineswegs bedeutet, daß Kraft, Energie und Impuls für grundsätzlich unterschiedliche Konzepte gehalten werden ("Eng beieinanderliegende Dinge", "Im Grunde dieselben Sachen").

Der Begründungstyp 3 wurde am häufigsten angeführt. Versuche, die Verschiedenheit der Begriffe Kraft, Energie und Impuls inhaltlich zu begründen, gingen jedoch meist fehl. Einige könnten eher als Begründung für eine Gleichsetzung dienen.

"Notwendig, weil Energie gespeicherte Kraft ist und nicht Kraft."

"Ich halte die Unterscheidung für notwendig, da zwischen den Begriffen geringe, jedoch wichtige Unterschiede bestehen, deren Inhalt möglicherweise für gewisse Versuche von Bedeutung ist."

"Ich halte es für sinnvoll, weil ich finde, daß ein großer Unterschied zwischen Kraft, gespeicherter Kraft und wirkender Kraft besteht."

"Das ist sicher keine Verkomplizierung, denn schließlich sind das im Endeffekt alles verschiedene Kräfte, die man nicht irgendwie gleichsetzen oder vereinfachen kann."

Die Analyse der schriftlichen Begründungen ist interessanter und aufschlußreicher als die pauschale Feststellung, daß 89% der Schüler sich für eine Unterscheidung zwischen Kraft, Energie und Impuls aussprechen. In den ablehnenden Stellungnahmen werden die Begriffe unter Verweis auf die Alltagssprache quasi gleichgesetzt. Der recht stark vertretene Begründungstyp 2 spiegelt die Art wieder, wie viele Schüler die Trennung von Kraft, Energie und Impuls lernen: Sie erwerben die Fähigkeit, in Standardsituationen den treffenden Begriff auszuwählen und dazu die passende Formel zu assoziieren. Man kann das eine "pragmatische" Einstellung nennen: Die Hauptsache ist, man weiß, welche Formel man anwenden muß. Amerikanische Untersuchungen (z.B. Arons 1981) zeigen, daß nur eine geringe Korrelation zwischen der Fähigkeit zur korrekten Lösung formaler Testaufgaben (Rechnungen) und echtem Begriffsverständnis besteht.

Aus den Antwortformulierungen geht zumindest bei einem Teil der Schüler hervor, daß sie in der Trennung zwischen Kraft und Energie eine Differenzierung zwischen verschiedenen 'Kräften' sehen - vergleichbar der Unterscheidung zwischen kinetischer und potentieller Energie. In keiner Antwort klingt eine wesensmäßige Unterscheidung zwischen einer Wechselwirkungsgröße Kraft und einer Bilanzgröße Energie an. Unterscheidungen beziehen sich weniger auf grundsätzlich andersartige Konzepte, sondern eher auf verschiedene Erscheinungsformen eines Konzepts - des Clusterbegriffs 'Kraft' als Wirkungsfähigkeit.

Zusammenhang von Kraft und Energie

In einer Nebenerhebung mit 70 Schülern aus elften Klassen (Vorerprobung der Befragungen 1 und 2) wurde die Aufgabe gestellt:

Beschreiben Sie in wenigen Sätzen, was Sie unter Kraft, Energie und Arbeit verstehen! (Z.B.: Wo liegen Unterschiede und Gemeinsamkeiten?)

Alle drei Begriffe waren in den ausgewählten Kursen vorher behandelt worden. Es folgt eine Zusammenstellung interessanter Aussagen:

"Physikalisch ist Arbeit ein Faktor, der eine Veränderung der Zustände von Körpern bewirkt. Diese Arbeit bezeichne ich als Kraft. Energie ist Kraft oder Arbeit, die dauernd da ist. Durch Energie wird nicht nur ein veränderter Zustand eines Körpers, sondern auch eine Umwandlung des Körpers erreicht."

"Kraft ist eine besondere Form von Energie." (mehrfach)

"Gemeinsamkeiten liegen in der Eigenschaft von Kraft und Energie, an einem Körper eine Wirkung zu verursachen. Von Kraft spricht man, nach meinem Wissen, nur bei einer speziellen Art solcher "Wirkungen", bei solchen, die den Körper im weitesten Sinne bewegen. "Energie", z.B. Wärmeenergie, kann die Eigenschaft eines Körpers verändern, Reaktionen ermöglichen usw. Die "Energie" eines Körpers ist durch die Bewegung seiner Teilchen gegeben. Sie kann also mehr bedeuten als "Kraft", die ich auf mechanische Wirkungen beschränken möchte."

"Kraft kann in Form von Energie vorliegen, aber auch anders, z.B. Gewichtskraft."

"Energie ist die Ursache aller auftretenden Kräfte." (mehrfach)

"Ich würde Kraft und Energie im Prinzip gleichsetzen. Der einzige Unterschied, wie ich meine, ist bloß, daß ein Körper von vornherein Energie beinhalten kann, daß aber Kraft immer aufgewendet werden muß."

"Energie ist Kraft, die erhalten bleibt."

"Energie kann gespeichert werden, Kraft nicht." (mehrfach)

"Wenn man einen Körper anstößt, läßt man eine Kraft wirken, die den Körper anstößt. Man verrichtet also gleichzeitig Arbeit, und der Körper bekommt Energie, mit der er Arbeit verrichten kann."

"Ein Körper hat Energie, wenn er eine bestimmte Höhe (Geschwindigkeit) hat, er also eine Kraft aufwenden kann."

"Um Kraft auszuüben braucht man Energie." (mehrfach)

In den teilweise sehr ausführlichen Antworten kommt das Bemühen der Schüler nach einer sinnvollen Abgrenzung der Begriffe zum Ausdruck. Zu einem großen Teil wird das in Form einer Oberbegriff-Unterbegriff-Relation versucht: Kraft ist eine spezielle, auf mechanische Vorgänge bezogene Form von Energie; Energie ist die Voraussetzung dafür, daß Kraft ausgeübt werden kann; oder auch andersherum: Energie ist eine Form von Kraft. Die zweite Argumentationsrichtung geht dahin, daß Kraft und Energie zwei Erscheinungsformen (die eine speicherbar, die andere nicht) des grundlegenden Konzepts 'Wirkungsfähigkeit'

sind. Es scheint so zu sein, daß der Energiebegriff mehr Anknüpfungspunkte zum Clusterbegriff 'Kraft' aufweist als der Newtonsche Kraftbegriff.

*

Die verbreitete Vorstellung, daß Kraft und Energie ineinander umwandelbar sind, beruht darauf, daß beide als etwas prinzipiell Gleiches angesehen werden: Kraft ist aktualisierte Wirkungsfähigkeit, Energie potentielle Wirkungsfähigkeit. Dazu ein kurzer Protokollauszug:

Kai Wenn man den Ball wegwirft, übt man ja eine Kraft auf ihn aus. Und diese Kraft speichert der Ball in Form von Energie. Und wenn der Ball dann auf den Boden stößt, dann formt er die Energie wieder in Kraft um und dadurch wird er wieder nach oben gestoßen. In dem Moment, wo eine Kraft ausgeübt wird, gibt sie an den Ball wieder Energie. Dadurch, daß er immer wieder etwas abgibt, durch Reibung, wird es immer weniger, bis er rollt. Es ist also immer eine Umwandlung von Kraft in Energie.

Lehrer Haben wir denn irgendwann schon von der Umwandlung von Kraft in Energie gesprochen?

Kai Ja.

Bei vielen im Unterricht behandelten mechanischen Vorgängen geht das Auftreten einer Kraft einher mit einer Zunahme der Energie des Körpers, an dem die Kraft angreift, und umgekehrt sinkt die Energie von Körpern die Kräfte ausüben (z.B. beim Entspannen der Feder eines Schußapparats). Es liegt daher nahe, das als Kraft-EnergieUmwandlung zu interpretieren. Die Entkopplung der Betrachtungsweise unter dem Aspekt wirkender Kräfte und der unter dem Aspekt von Energieumwandlungen bereitet Schülern Schwierigkeiten. Kais Eindruck, im Unterricht sei von der Umwandelbarkeit Kraft - Energie gesprochen worden, zeigt, daß man die explizite Diskussion dieser Vorstellung nicht umgehen kann. Sie entwickelt sich sonst unschwellig und bleibt unhinterfragt bestehen.

*

Newtonsche Elemente des Clusterbegriffs

Zum Clusterbegriff 'Kraft' gehört als eine Facette auch die im newtonschen Sinne ausbaufähige Verbindung von Kraft und Beschleunigung. Wir sprechen vom Bestehen dieser Verbindung im Vorverständnis von Schülern bereits vor der Behandlung der Newtonschen Axiome in der Dynamik.

In der Stunde, aus der die folgenden Einzelzitate stammen, ging es um die Auswertung von Beschleunigungsexperimenten auf Fahrbahnen unter kinematischen

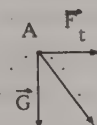
Gesichtspunkten. Die dynamischen Beiträge brachten die Schüler von sich aus ein. Der Kraftbegriff war im Unterricht noch nicht behandelt worden. Die zitierten Schüler stellen eine Verbindung zwischen resultierender Kraft und Beschleunigung her, die in dieser klaren Weise manchmal nicht einmal nach ausführlicher Behandlung des Newtonschen Konzepts erreicht wird.

Peter Wenn die Fahrbahn lang genug wäre, träte meiner Meinung nach eine Höchstgeschwindigkeit auf. Die Geschwindigkeit würde sich immer etwas erhöhen, weil das Fahrzeug immer etwas beschleunigen würde. Erst wenn der Reibungswiderstand und der Luftwiderstand so groß geworden sind wie die beschleunigende Kraft, dann würde sich eine konstante Geschwindigkeit ergeben. Dies geschieht aber nur bei Aufhebung der Kräfte. Sonst, würde ich sagen, ergibt sich eine konstante Beschleunigung.

Frank Wenn sich die antreibende Kraft mit der Reibungskraft aufhebt, dann kann eben keine beschleunigende Kraft mehr vorhanden sein, durch die der Wagen schneller wird.

Kai Bei der Maximalgeschwindigkeit heben sich antreibende Kraft und Gegenkraft auf. Zu Anfang ist eine Kraft stärker als die andere. Die Geschwindigkeit wird irgendwann nicht mehr größer. Dann muß die Beschleunigung Null sein - also maximale Geschwindigkeit.

Das Beispiel zeigt, daß auch ohne formale Behandlung des Newtonschen Konzepts Elemente desselben in individuellen Vorverständnissen vorhanden sind - unsere These lautet: als Teile des Clusterbegriffs. Von Kai liegen Äußerungen vor, in denen er (nach der Einführung des Newtonschen Kraftbegriffs) von "Kraftübertragung" (beim Stoß) oder Kraft-Energie-Umwandlung spricht (siehe oben). Bei Peter und Frank ist das seltener, kommt aber auch vor. So nahm Frank bei der Bearbeitung von Aufgabe B1 des Tests DAM (siehe B.2.2.2) eine Kraft in Bahnrichtung an (" $\vec{F}_t$ (angential)") und setzte diese mit der Gewichtskraft (" $\vec{G}$ ") so zusammen, daß die Resultierende in Richtung der weiteren Bewegung zeigt. Schüler, die in der einen Situation 'Kraft' im newtonschen Sinne verwenden (und zwar unaufgefordert), aktivieren in anderen Situationen alternativ oder zusätzlich andere Facetten des Clusters.



Schüler definieren Kraft

Im Test DTK (siehe B.2.2.2) wurden 254 Schüler aufgefordert, den Begriff Kraft zu umschreiben:

Was ist Kraft? Denken Sie sorgfältig nach und beschreiben Sie den Begriff präzise, aber kurz! (Nach einer Gleichung ist nicht gefragt!)

Die Antworten zeigen, was Schüler sich am Ende eines sechsmonatigen Mechanikkurses inhaltlich unter Kraft vorstellen. Zu der Weise, wie die Antworten zustandegekommen sein können, haben wir unter Punkt B.2.2.2 einiges ausgeführt. Die Ergebnisse der Auswertung werden aus drei Blickwinkeln vorgestellt:

1. In einer Gesamtschau des Antwortbildes anhand der Verteilung zentraler Definitionselemente.
2. In einer Einzeldarstellung besonders interessanter Definitionen.
3. In einem Vergleich der Antworten von Grund- und Leistungskursschülern.

1) Zentrale Definitionselemente und ihre Verteilung

Aus der Durchsicht aller Antworten wurden häufig auftretende Kernelemente der Schülerdefinitionen von Kraft bestimmt. In einem zweiten Durchgang durch die Fragebögen wurde die Antreffhäufigkeit dieser Elemente in der Gesamtpopulation ausgezählt. Die Verteilung der Elemente ist in Abbildung wiedergegeben (siehe folgende Seite). Die Zahlenwerte geben an, wieviel Prozent der Schüler (N = 254) das jeweilige Definitionselement in ihren Antworten verwendet haben. Die Summe liegt über 100%, weil die Antworten teilweise aus mehreren Elementen bestehen. Wir beziehen uns im folgenden auf die Abbildung B1 (umseitig).

a) Die meistgenannte Antwort lautet, Kraft werde benötigt, um einen Gegenstand zu beschleunigen oder eine Bewegung/Geschwindigkeit zu verändern. Das wird von 25,6% aller Schüler ausgesagt. Überraschenderweise stellt kaum ein Schüler einen Zusammenhang zwischen Kraft und Impulsänderung her. Setzt man voraus, daß Beschleunigung bzw. Geschwindigkeit physikalisch konzeptualisiert sind, so ist dies die konventionelle Umschreibung des Kraftbegriffs: Immer wenn sich der Bewegungszustand eines Körpers ändert, ist eine (resultierende) Kraft im Spiel. Die Frage, was für ein Begriff Kraft ist und wodurch er sich z.B. von Energie unterscheidet, bleibt allerdings offen. Schüler, die so antworten, können sich darunter noch immer eine spezielle Art von Energie vorstellen oder Kraft als Eigenschaft des Körpers ansehen, der sie ausübt. Dazu ein Zitat:

"Kraft ist etwas, das man braucht, um z.B. eine bestimmte Bewegung zu verändern oder einen in Ruhe befindlichen Gegenstand in Bewegung zu versetzen."

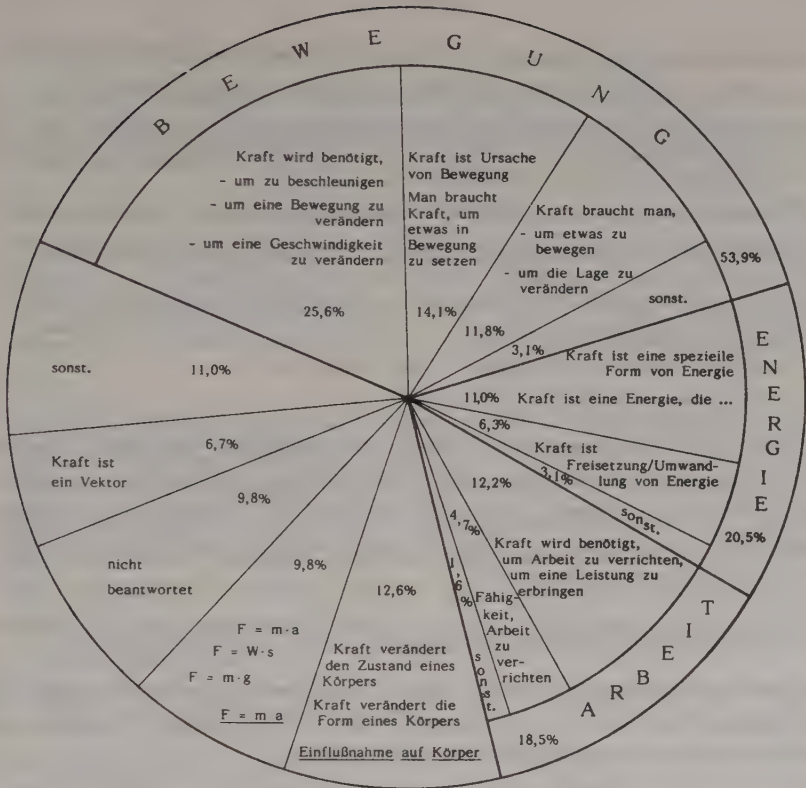


Abb. B1: Antreffhäufigkeiten zentraler Definitionselemente in den Antworten auf die Frage "Was ist Kraft?" (Definitionstest Kraft; DTK)

b) An zweiter Stelle steht die Aussage, Kraft sei die Ursache von Bewegung (14,1%). Hier steht das In-Bewegung-Setzen aus dem Zustand der Ruhe im Vordergrund. Kraft dient nach diesem Verständnis zur Herstellung einer Bewegung und ist mehr an die erzeugte Bewegung gebunden als an den zeitlichen Vorgang der Bewegungsänderung:

"Kraft ist der Begriff einer Komponente, die einen Körper aus der Ruhelage in eine Bewegung versetzt."

c) Knapp 12% schreiben, man brauche Kraft, um etwas zu bewegen. Unklar bleibt, ob damit ein Nettoüberschuß an Bewegungskraft über Reibungswiderstände gemeint ist oder eine Einzelkraft, die gegen andere (Reibungs-) Kräfte einen

Körper antreibt. Auf jeden Fall gilt das Augenmerk der Schüler primär der Kraft, die dem Aufrechterhalten der Bewegung dient. Zwei Antworten:

"Ein Körper erhält die Geschwindigkeit 1m/s, wenn man ihn mit 1 Newton zieht. Ein Körper ist in Bewegung, wenn er seinen Ruhezustand verläßt. Bei der Bewegung wird Arbeit verrichtet."

"Wenn eine Kraft auf einen Körper wirkt, wird dieser seine Lage verändern."

d) 11% der Schüler bezeichnen Kraft explizit als eine spezielle Energieform:

"Kraft ist die Energie, die aufgewendet werden muß, um etwas zu bewegen."

"Kraft ist gespeicherte Energie."

"Kraft ist Energie, die auf einen Gegenstand wirkt."

"Kraft ist mechanische Energie."

Wie wir schon einmal festgestellt haben, wird Energie als Oberbegriff gesehen und Kraft als spezielle Erscheinungsform von Energie. Grundkurschüler tendieren sehr viel stärker zu diesem Antworttyp als Schüler aus Leistungskursen (siehe unten). Ein Schüler stellte den folgenden Zusammenhang zwischen Kraft, Energie und Beschleunigung her:

"Kraft ist eine Energieform, die aufgewendet werden muß, um einen Körper zu verändern oder ihn zu beschleunigen."

Ein Teil der Schüler, die schreiben "Kraft wird benötigt, um einen Körper zu beschleunigen", dürfte Kraft in ähnlicher Weise als Energieform verstehen, die beim Beschleunigen eines Körpers umgesetzt wird.

e) Eine interessante Kategorie lautet: "Kraft ist Umsetzung/Freisetzung von Energie" (6,3%).

"In einem geschlossenen System ist eine angewandte Kraft eine Art Energiemixer: Sie bringt die vorhandenen Energieformen in ein anderes Verhältnis zueinander und/oder bildet sogar neue."

Man kann das als "Katalysatorvorstellung" bezeichnen. Tatsächlich tritt bei mechanischen Energieumwandlungen immer eine Kraft auf (z.B. Spannenergie → kinetische Energie beim Schußapparat: elastische Kraft; potentielle Energie → kinetische Energie beim freien Fall: Schwerkraft). Zwei weitere Schüleräußerungen dazu:

"Kraft ist Umsetzung von Energie in Arbeit (Leistung)."

"Um Arbeit zu verrichten, muß man eine Kraft einsetzen, und dabei wird Energie freigesetzt bzw. übertragen."

In einer Vorerprobung des Fragebogens schrieb ein Schüler sehr treffend:

"Kraft ist die Stärke der Erscheinung von der umgewandelten Energie."

Kraft beschreibt nach dieser Vorstellung die Intensität einer Energieumwandlung.

"Kraft ist das spürbare Produkt der Energie: Z.B. ein Stein fällt vom Tisch. Er besitzt im Flug Bewegungsenergie. Beim Aufprall auf den Boden wird die Stärke der Energie deutlich. Der Einschlag ist abhängig von der Kraft. Kraft kann man aber nicht speichern."

Kraft als (zeitliche) Intensität einer Impulsänderung wäre physikalisch vollkommen korrekt, ebenso eine vektoriell auf den Weg bezogene Energieänderung. Schüler, die zwischen einer extensiven Größe Energie und einer intensiven Größe Kraft unterscheiden, vollziehen einen Schritt, der auch bei der wissenschaftlichen Genese des Kraftbegriffs eine wichtige Rolle gespielt hat (siehe dazu Punkt D.4).

f) Häufig wurde Kraft im Zusammenhang mit Arbeit umschrieben. 12% antworteten, Kraft werde benötigt, um eine Arbeit zu verrichten bzw. eine Leistung zu erbringen. 5% schrieben, Kraft sei die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. In beiden Fällen liegt eine Deutung der Floskel "Arbeit ist Kraft mal Weg" vor, bei der Kraft als Eigenschaft eines Körpers gesehen wird, als ein "Etwas", das der Körper besitzt, um Arbeit verrichten zu können (Kraft als Potenz).

"Mit Kraft kann man Arbeit verrichten. Mit Kraft kann man auch Geld verdienen (Boxer, Catcher)."

"Kraft wird benötigt, um Arbeit zu verrichten. Je schwerer die Arbeit, desto mehr Kraft muß aufgebracht werden."

Hier wirkt sich die assoziative Nähe zwischen Kraft und Körperstärke aus. Weder Kraft noch Arbeit sind physikalisch konzeptualisiert.

Einige Schüler vermittelten den Zusammenhang Kraft - Arbeit über die Energie:

"Kraft ist die Energie, die man aufbringen muß, um Arbeit zu verrichten (z.B. einen Gegenstand in eine bestimmte Richtung zu bringen)."

g) Das Definitionselement "Einflußnahme auf Körper" trat meist auf als: "Kraft bewirkt eine Veränderung der Form eines Körpers". Damit wird der statische Kraftbegriff angesprochen.

h) Überraschend wenige Antworten beschränken sich auf die Angabe einer Formel (bevorzugt $F = m \cdot a$) bzw. auf deren Verbalisierung ("Kraft ist Masse mal Beschleunigung"). Der Anteil von Nichtbeantwortungen ist ebenfalls gering. Die Schüler haben sich um eigenständige Formulierungen bemüht.

Fragt man danach, wie Schüler den Begriff Kraft wesensmäßig einordnen, so kommt man zu 2 Kategorien:

I Kraft als Eigenschaft

Kraft ist Etwas, das in Körpern vorhanden ist und das benötigt wird, um andere Körper zu beschleunigen, zu verformen, zu bewegen oder um eine Arbeit zu verrichten. Dieses "Etwas" wird als "Energie", als "Fähigkeit" oder als "Zustand" bezeichnet. Beispiele:

"Kraft ist eine Sache, die in jedem Körper vorhanden ist, und somit eine Veränderung einer Bahn eines anderen Körpers verursachen kann."

"Kraft ist ein Zustand, den man benötigt, um etwas in Bewegung zu setzen."

Zur Kategorie I gehört ein Großteil der Subsumierungen von Kraft unter Energie.

"Kraft ist die Energie, die man aufwenden muß, um Arbeit zu verrichten. Z.B. ist Hubkraft die Arbeit, die man aufwenden muß, um einen Körper gegen die Anziehungskraft zu heben."

II Kraft als Ding

Kraft ist eine eigenständig existierende (d.h. nicht an Körper gebundene) Entität, die man nicht direkt sehen kann, sondern nur in ihren Wirkungen (Beschleunigung, Bewegung, Verformung):

"Kraft ist ein nicht sichtbares Ding, das Körper in Bewegung versetzen kann."

"Kraft eine physikalische Größe, die nicht direkt zu sehen oder zu berühren ist. Elektrische Maschinen können mit Kraft arbeiten. Kraft ist nur dann zu sehen oder zu hören, wenn mit ihr Geräte betrieben werden."

"Kraft ist jegliche Form von Energie, die Arbeit verrichten kann (d.h. einen bestimmten Zustand verändern kann)."

Beide Kategorien liegen dem physikalischen Energiebegriff näher als dem Newtonschen Kraftbegriff. Schulbuchaussagen wie "Kraft ist die Ursache der Beschleunigung oder Verformung von Körpern" können von Schülern leicht unter die Kategorisierungen von Kraft als Körpereigenschaft oder als eigenständig existierende Wesenheit eingeordnet werden. Zur Verdeutlichung des relationalen Charakters, der in den Definitionen der Schüler kaum zum Ausdruck kommt, schlagen wir die folgende, keineswegs vollständige, Umschreibung des Kraftbegriffs vor:

Kraft ist eine Rechengröße zur quantitativen Erfassung der gegenseitigen Beeinflussung zweier Körper (Wechselwirkung). Die Wechselwirkung kann z.B. in einer Anziehung oder Abstoßung bestehen. Man sagt statt "Körper stehen in Wechselwirkung miteinander" auch, die Körper üben Kräfte aufeinander aus. Man spricht vom Bestehen einer Kraft nur so lange, wie die Wechselwirkung andauert. Kraft bezeichnet also keine Eigenschaft von Körpern und hat

auch nichts mit Körperstärke zu tun. Kraft bezieht sich allein auf den Prozeß der gegenseitigen Beeinflussung: Wechselwirkungsstärke.

Oft betrachtet man nicht beide Körper, die in Wechselwirkung stehen, gleichzeitig, sondern konzentriert sich auf einen Körper. Auf einen Körper können verschiedene Kräfte einwirken, d.h. er kann gleichzeitig von verschiedenen Körpern beeinflusst werden. Die Überlagerung dieser Einwirkungen (die Summe aller angreifenden Kräfte nach Richtung und Betrag) heißt "resultierende Kraft". Während des Zeitraums, in dem ein Körper eine resultierende Kraft erfährt, ändert sich sein Impuls. Dies wird durch die Gleichung $\overrightarrow{\Delta p} = \vec{F} \Delta t$ ausgedrückt.

2) Interessante Einzelaussagen

Neben den bereits zitierten gibt es weitere interessante Antworten. Wir wollen einige vorstellen. (Eine vollständige Liste findet sich im Anhang des Auswertungsberichts über die Befragung 2; Schecker 1984).

Ein Schüler schrieb ganz im Sinne der obenstehenden Umschreibung:

"Kraft ist eine Beziehung zwischen zwei oder mehreren Körpern. Man kann die Kraft nur in bezug auf einen weiteren Körper errechnen."

Das Verständnis von Kraft als Körpereigenschaft/Potenz kommt in den folgenden zwei Aussagen zum Tragen:

"Kraft ist die Möglichkeit, etwas in Bewegung zu setzen oder anzuheben (Muskelkraft). Voraussetzung dafür, daß Kraft wirken kann, ist, daß Energie vorhanden ist oder vorhanden gewesen ist."

"Kraft benutzt man im täglichen Leben genauso wie in der Physik, z.B. beim Sport, Arbeiten oder bei anderen Hobbys. Auf jeden Körper wirkt eigentlich eine Kraft."

In der letzten Aussage wird der alltägliche Kraftbegriff direkt auf den physikalischen übertragen.

Einige Antworten auf die Frage "Was ist Kraft?" sind für die später vorzunehmende Aufschlüsselung des Clusterbegriffs interessant (siehe die Präkonzepte P3-1 bis P3-3):

"Wenn ein Körper eine Kraft erfährt, wirkt sie immer in Richtung des Weges."

"Kraft bestimmt die Bewegungsrichtung."

"Kraft hängt von der Masse eines Körpers ab, und je schneller ein Körper ist, desto mehr Kraft hat er."

"Um einen Körper zu bewegen, muß eine Kraft aufgewendet werden, die größer ist als die Reibung des Körpers." (Hervorhebung d.Verf.)

3) Vergleich zwischen Leistungskurs- und Grundkursschülern

Beim Vergleich der prozentualen Antreffhäufigkeiten der Definitionselemente bei Leistungs- bzw. Grundkursschülern erkennt man auf einigen Feldern interessante Unterschiede (vgl. Abb. B2 auf der folgenden Seite).

- Leistungskursschüler definieren Kraft mehr als doppelt so häufig über die Beschleunigung (38% gegenüber 16,4% in Grundkursen).
- Kraftumschreibungen anhand der Termini Energie und Arbeit sind vornehmlich bei Grundkursschülern zu finden, insgesamt bei etwa der Hälfte der Grundkursler, aber nur bei weniger als einem Viertel der Leistungskursler. Auf die Aussage, Kraft sei eine besondere Form von Energie, trifft man bei 16,4% der Schüler in Grundkursen aber nur bei 3,7% der Leistungskursschüler! Davon, daß Kraft benötigt werde, um Arbeit zu verrichten, sprechen 15,8% der Grundkursler gegenüber 7,4% der Leistungskursler.
- Der Anteil formaler Antworten ($F = m \cdot a$) ist bei den Leistungskurslern mit 16,6% mehr als dreimal so hoch wie bei Grundkurslern. (Die Frage "Was ist Kraft?" hatte den Zusatz "Nach einer Gleichung ist nicht gefragt!".) Wir werten das als Zeichen einer in Leistungskursen deutlicher ausgeprägten Tendenz, Physik formelmäßig zu erfassen und sich damit auch zufriedenzugeben (vgl. Denkrahen 8 "Formelfixierung"; B.3.2.2.4).
- Gemeinsamkeiten in den Antwortverteilungen bestehen bei den Aussagen, Kraft sei die Ursache von Bewegungen oder man brauche Kraft, um etwas zu bewegen (jeweilige Antreffhäufigkeiten zwischen 10% und 15%). Auch die Zahlen für die Nichtbeantwortungen stimmen in etwa überein.

Fazit

Das zentrale Element der Newtonschen Axiome - der Zusammenhang zwischen Kraftstoß und Impulsänderung, bzw. zwischen Kraft und Beschleunigung - erscheint nur in einem Viertel aller Definitionen. In Grundkursen liegt dieses Definitionselement gleichauf mit der Aussage, Kraft werde benötigt, um Arbeit zu verrichten. Wesensmäßig wird Kraft als Körpereigenschaft oder als selbständige Entität aufgefaßt. Grundkursschüler setzen Kraft und Energie oft im Grunde gleich (Kraft als spezielle Energieform). Kraft als Rechengröße, die sich auf den zeitlichen Prozeß der Wechselwirkung bezieht, wird von kaum einem Schüler angesprochen. Die Abgrenzung einer zum Zwecke quantitativer Vorhersagen geschaffenen, abstrakten Rechengröße Kraft vom lebensweltlichen Clusterbegriff 'Kraft', der eine allgemeine Wirkungsfähigkeit ausdrückt, haben viele Schüler noch nicht vollzogen.

B E W E G U N G	Kraft wird benötigt, um etwas zu <u>beschleunigen</u>	16,4%	38,0%	Kraft wird benötigt, um etwas zu <u>beschleunigen</u>	B E W E G U N G
	Kraft ist <u>Ursache von</u> <u>Bewegung</u>	12,3%			
	Kraft braucht man, um etwas zu <u>bewegen</u>	10,3%			
	sonst.	2,7%	14,8%	Kraft ist <u>Ursache von</u> <u>Bewegung</u>	
	Kraft ist eine <u>spezielle</u> <u>Form von Energie</u>	16,4%	13,9%	Kraft braucht man, um etwas zu <u>bewegen</u>	
	Kraft ist <u>Freisetzung/</u> <u>Umwandlung von Energie</u>	7,5%	3,7%	sonst.	
	sonst.	3,4%	4,6%	<u>spezielle Form von Energie</u>	
	Kraft wird benötigt um <u>Arbeit zu verrichten</u>	15,8%	7,4%	<u>Freisetzung von Energie</u>	
	Kraft ist die <u>Fähigkeit,</u> <u>Arbeit zu verrichten</u>	5,5%	3,7%	sonst.	
	sonst.	1,4%	1,9%	Kraft <u>verändert die Form</u> eines Körpers	
E N E R G I E				Kraft <u>verändert die Form</u> eines Körpers	E n e r g i e
				<u>Einflußnahme auf Körper</u>	
				nicht beantwortet	
				Kraft ist ein <u>Vektor</u>	
				$F = m \cdot a$	
				sonst.	
A R B E I T					A r b e i t

Grundkursschüler (N = 146)

Leistungskursschüler
(N = 108)

Abb. B2: Antreffhäufigkeiten zentraler Definitionselemente in den Antworten auf die Frage "Was ist Kraft?" (Definitionstest Kraft; DTK)

B.3.3.2.2

Präkonzept 3-1: Bewegte Körper haben Kraft

P3-1: Körper, die sich in Bewegung befinden, besitzen eine Kraft, die von Masse und Tempo abhängt.

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Beim Präkonzept 3-1 handelt es sich um eine der stabilsten Facetten des Clusterbegriffs 'Kraft': Ein in Bewegung befindlicher Körper besitzt Kraft (/Wucht/Schwung). Man erkennt diese Kraft einmal in seiner Eigenbewegung (Durchsetzung gegen Bewegungswiderstände) und zum anderen in der Beeinflussung anderer Körper beim Stoß. Der Körper besitzt die Kraft, die beim Stoß z.B. in der Verformung anderer Körper sichtbar wird, auch ohne sie aktuell auszuüben. Die potentielle Wirkungsfähigkeit wird von Schülern auch mit dem Wort Energie bezeichnet. Bei einer Differenzierung zwischen Kraft und Energie wird Kraft meist als aktualisierte Wirkungsfähigkeit verstanden und Energie als gespeicherte Wirkungsfähigkeit. Kraft wird nicht auf den Stoßprozeß in seinem zeitlichen Verlauf bezogen (Kraft als Funktion der Zeit), sondern an der Gesamtwirkung gemessen (z.B. große Stauchung einer Feder = große Kraft). Zudem bestimmt der aktive, in Bewegung befindliche Körper allein die Kraft; sie ergibt sich nicht aus der Wechselwirkung zweier Körper.

Die Kraft/Energie ist beim In-Bewegung-Setzen des Körpers vom Beweger auf ihn übertragen worden. Andererseits kann der bewegte Körper Kraft an andere Körper weitergeben. Eine Erweiterung des an Bewegung gebundenen Potenz-Konzepts von Kraft besteht darin, auch Körpern in Spannungszuständen (elastisch verformte Körper, angespannte Muskeln) eine Kraft zuzusprechen. Daß das Präkonzept P3-1 hat Bezüge zum Energiebegriff. Man kann jedoch nicht einfach die Schüleraussagen dadurch mit dem physikalischen System vereinen, daß man unterstellt, die Schüler arbeiteten mit dem Energiebegriff und verwendeten lediglich ein anderes Begriffswort. Dem steht die Vorstellung der Umwandelbarkeit von Kraft und Energie entgegen.

Es ist ein zentrales Ergebnis der Untersuchung von Präkonzepten zum Kraftbegriff, daß ein isoliertes Verständnis des Kraftbegriffs ebenso wenig möglich ist wie des Energiebegriffs, da Elemente beider physikalischer Konzepte im Clusterbegriff 'Kraft' ineinander verwoben sind. Im Vorverständnis der Schüler werden bei Behandlung des Newtonschen Kraftbegriffs immer auch Elemente des Clusterbegriffs aktiviert, die eher zum Energiebegriff passen. Kraft und Energie werden als physikalische Begriffe nicht nacheinander, sondern, wenn

überhaupt, nur in einem längeren Prozeß gegenseitiger Abgrenzung gebildet. Die Parallelen zur wissenschaftlichen Genese des Kraftbegriffs werden unter Punkt D.4 nachgezeichnet.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Kraft ist proportional zur Wirkung

Beginnen wir mit einigen Schüleraussagen zum Zusammenhang von Kraft, Energie und Bewegung. Sie stammen aus Unterrichtsphasen nach Einführung des Newtonschen Kraftbegriffs.

"Energie ist eine dem Körper innewohnende Eigenschaft. Kraft ist eine dem bewegten (Hervorhebung d. Verf.) Körper innewohnende Eigenschaft."

"Energie ist eine Art lebendige Kraft, die in einem Körper gespeichert ist."

"Kraft ist die umgewandelte kinetische Energie, die das Auto innehat, bevor es gegen die Wand prallt."

In SVUs ist eines der beliebtesten Untersuchungsthemen die "Kraftübertragung" beim Stoß zweier Körper. Dabei wird als Maß für die Kraft des jeweiligen Körpers durchgängig seine Geschwindigkeit (Tempo) genommen.

Die Proportionalität zwischen Kraft und Geschwindigkeit drückt sich nach Meinung der Schüler besonders in der Abhängigkeit der Wirkung eines Stoßes vom Tempo des "stoßenden" Körpers aus. Es ist manchmal schwer zu entscheiden, ob die Aussage "Je höher die Geschwindigkeit, desto höher die Kraft" sich auf eine Kraft des Körpers vor dem Stoß bezieht oder auf eine durch den Stoß ausgelöste Kraftwirkung. Gleichgültig, ob eine Kraft gemeint ist, die der bewegte Körper hat, oder eine, die er ausübt: sie wird an der Gesamtwirkung bilanziert, d.h. am Vergleich von Anfangs- und Endzustand des "gestoßenen" Körpers.

Im folgenden Protokollauszug unterhalten sich Lehrer und Schüler über Versuche aus einer SVU-Phase.

Lehrer Fast alle Gruppen haben sich mit dem Zusammenhang von Geschwindigkeit und Aufprallkraft oder Kraft beim Aufprall beschäftigt. Kann da jemand mal ein Ergebnis vorlesen?

S 1 Je größer der Aufprall oder je stärker der Aufprall, desto stärker ist auch die Kraft.

Lehrer Habt ihr das so formuliert?

S 1 Da muß ich nochmal gucken. (blättert im Versuchsprotokoll)

Lehrer Ich glaube das hieß: (schau auch hinein) Je größer die Geschwindigkeit - das kann man aus der Tabelle sehen - desto größer die Kraft.

Sonja Was war das jetzt? Je größer die Bremskraft - oder?

S 2 → Das kann auch die Kraft auf die Insassen sein.

Lehrer Ich könnt ja nochmal euren Versuch schildern.

Die Schüler 1 und 2 schildern ihren Versuch. Es wurde auf einer Fahrbahn ein Wagen mittels eines Beschleunigungsgewichts auf verschiedene Geschwindigkeiten gebracht und dann mit einem Kraftmesser (Federwaage) abgebremst, der über einen Faden mit dem Wagen verbunden war. Als Maß für die Kraft galt der maximal vom Kraftmesser angezeigte Wert.

Lehrer Vielleicht können wir nochmal Sonjas Frage aufgreifen.

Sonja Ja, ist Aufprallkraft gleich Bremskraft?

Lehrer Welche Gruppe war das, die im Protokoll geschrieben hat "Je größer die Geschwindigkeit, desto größer die Aufprallkraft"?

Klaus Oh je, das waren wir.

Lehrer Du kannst es dir leicht machen und Sonja erstmal fragen, was bei ihrer Gruppe "Bremskraft" bedeutet.

S 3 Ja genau, sag uns das erstmal.

Sonja Ja, also bei uns ist es praktisch die Kraft, die eine Geschwindigkeit eines Fahrzeuges verringert oder stoppt.

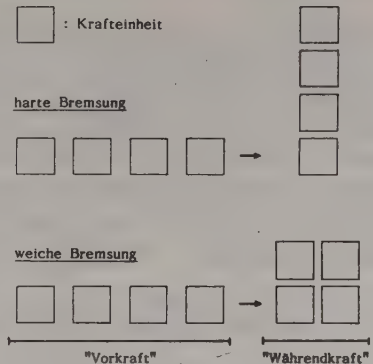
Klaus Also, unsere Aufprallkraft, das ist eben - Wir haben den Newtonmeter hinter den Wagen gespannt - das ist ein Aufprall - und dann geguckt, wieviel Kraft der anzeigt.

Lehrer Die Aufprallkraft war die mit dem Kraftmesser, der hinten mit dem Seil drangebunden war. Und was ist bei euch die Bremskraft? Wie habt ihr die gemacht - mit welchem Gerät?

Sonja Ja, auch mit dem Kraftmesser.

Die Versuchsanordnungen der Gruppen von Sonja und Klaus waren gleich. Beide haben pragmatisch den vom Kraftmesser in der maximalen Auslenkung angezeigten Wert als die Kraft festgehalten, die den Vorgang kennzeichnet. Für Sonja ist das die "Bremskraft", die dafür sorgt, daß der Wagen gestoppt wird, für Klaus dagegen die "Aufprallkraft", also die Kraft, mit der der Wagen aufprallt. (Die Experimente sollten Verkehrsunfälle simulieren.) Klaus' Idee läßt sich als Messung der in Spannenergie umgewandelten kinetischen Energie interpretieren. Sonjas Grundgedanke, Kraft in einen Zusammenhang mit Bewegungsänderung zu stellen, bietet mehr Anknüpfungspunkte zum Newtonschen Konzept. Allerdings fehlt der Faktor Zeit. Für sie ist die Kraft, die benötigt wird, um die Geschwindigkeit des Wagens auf Null zu bringen, durch die Geschwindigkeit selbst bestimmt. Das Maß für die Kraft ist die Tempoänderung: Je größer die Kraft, desto größer die Tempoabnahme - ohne Betrachtung des Zeitraums. Bei Temposteigerungen argumentieren Schüler oft in gleicher Weise. Große Tempodifferenzen werden auf große Kräfte zurückgeführt: Große Kräfte erkennt man an großen Gesamtwirkungen.

Im weiteren Verlauf des Unterrichts, aus dem wir eben zitiert haben, kam es zu einer interessanten und weiterführenden Differenzierung zwischen Aufprall- und Bremskraft. Angeregt durch "weiche" bzw. "harte" Abbremsungen der Experimentierwagen (realisiert über Federwaagen mit unterschiedlichen Federkonstanten), entwickelten Schülern die Idee, daß sich bei einer weichen Bremsung die "Vorkraft des Wagens" (Kraft vor Aufprall/Bremsung) auf einen längeren Weg verteile, so daß sich eine kleinere "Währendkraft" ergebe (Kraft während der Bremsung). Die "Währendkraft" wurde dabei noch immer an der maximalen Anzeige des Kraftmessers festgemacht. Zur Veranschaulichung wurde die nebenstehende Zeichnung vorgeschlagen. Diese Differenzierung ist ein Schritt auf dem Weg zur Abkopplung einer intensiven Größe "Währendkraft" (Kraft) von einer extensiven Größe "Vorkraft" (kinetische Energie).



*

Kraft ist proportional zur Geschwindigkeit - Fallstudie

Im folgenden Unterrichtsprotokoll machen Schüler Vorschläge für experimentelle Anordnungen, an denen man den Zusammenhang von Kraft und Bewegung untersuchen kann. Der Lehrer denkt zur Einführung des Satzes ' $a = F/m$ ' an die üblichen Fahrbahnexperimente, bei denen ein Wagen über ein angehängtes Gewichtstück beschleunigt wird. In der vorhergehenden Stunde war unter starker Lehrerteuerung ein Zusammenhang zwischen Kraft, Masse und Beschleunigung hergestellt und schriftlich fixiert worden.

Lehrer Wir hatten uns vorgenommen, heute die Planung für die Versuche zu machen. Wir wollten diesem Begriff Kraft nachspüren und feststellen, wie Kraft, Masse und Beschleunigung zusammenhängen. Ich wollte eigentlich jetzt von euch mal Vorschläge hören, was man da so tun kann.

Frank Kraft war Masse mal Geschwindigkeit. - Ich meine, da sollte man erstmal einem Wagen eine Geschwindigkeit geben und dann die Geschwindigkeit verändern und auch die Masse verändern, so daß immer die gleiche Kraft rauskommt.

Lehrer Kannst du noch einmal deinen ersten Satz sagen.

Frank Kraft gleich Masse mal Geschwindigkeit.

Lehrer Ja - (zögert) ja, was hat das damit auf sich - Kraft gleich Masse mal Geschwindigkeit?

Phillip m mal v war ja der Impuls.

Lehrer Wir wollten aber jetzt gerade mal den neuen Begriff Kraft ins Spiel bringen. Wir hatten ja gesagt, Kraft wird etwas am Bewegungszustand eines Körpers ändern. (...) Und jetzt ging es darum, diesen Zusammenhang quantitativ zu erfassen.

Schüler (blättern in ihren Heften, langes Schweigen)

Obwohl der Lehrer in der vorangegangenen Stunde viel Mühe auf die Herstellung eines Zusammenhangs zwischen Kraft und Beschleunigung verwendet hat, beginnt Frank mit dem apodiktischen Satz "Kraft war Masse mal Geschwindigkeit". Frank denkt an eine Eigenschaft/Potenz des bewegten Körpers, die ihm von außen verliehen wird: "Man sollte erstmal dem Wagen eine Geschwindigkeit geben ..." Auch weitere Versuchsvorschläge gehen von einer "Kraftübertragung" aus. Die Kraft wird an der erzielten Gesamtwirkung, z.B. der erreichten Endgeschwindigkeit, festgemacht.

Malte (liest aus Heft vor) Ändert ein Körper seinen Bewegungszustand in Richtung oder Betrag seiner Geschwindigkeit, dann wirkt eine Kraft.

Lehrer Das war unsere Grundüberlegung. Dazu hatten wir schon Vermutungen angestellt, wie das wohl sein könnte.

Albert Wir hatten gesagt, daß bei gleicher Kraft praktisch ein Körper größerer Masse anders reagieren würde als ein Körper kleinerer Masse. Das könnte man im Versuch dadurch belegen, daß man Federn nimmt; die spannt man, nimmt Körper verschiedener Masse, läßt die losfahren und mißt die Geschwindigkeiten - und aufgrund der verschiedenen Geschwindigkeiten kann man dann auf die Kraft schließen, die ausgeübt wurde.

Lehrer Hm, nun ist der Begriff der Geschwindigkeit bei dem, was wir zu Kraft aufgeschrieben hatten gar nicht dabei.

Albert Ja, aber aufgrund der Geschwindigkeit kann man ja auf die Kraft schließen.

Lehrer Geht das so einfach? - - - (lange Pause) (wiederholt Arnos Vorschlag) Welche Schwierigkeiten treten dabei auf?

Rainer Sie haben eben gesagt, wir brauchen die Geschwindigkeit nicht, nur die Beschleunigung. Aber wenn wir die Geschwindigkeiten haben, dann könnte man auch den Weg ausrechnen und dann die Beschleunigung. Das wäre ja nicht so schwierig.

Lehrer Welche Kenntnisse braucht man, um eine Beschleunigung zu ermitteln?

Schüler (langes Schweigen)

Albert will die Kraft an den erreichten Endgeschwindigkeiten von Wagen messen, die von gespannten Federn in Bewegung gesetzt wurden. Kraft wird als übertragbare, extensive Größe verstanden. Rainers Äußerung liegt der Denkrahmens 8 "Formelfixierung" zugrunde. Er meint, es werde schon die passenden Formeln geben, die es erlauben, bei Kenntnis einer Geschwindigkeit auf die Beschleuni-

gung zurückzurechnen.

Wir überspringen eine Phase, in der der Lehrer Alberts Vorschlag als unpraktikabel bezeichnet, weil die Beschleunigungsphase sehr kurz und daher schwer zu messen sei. Er interpretiert Alberts Vorschlag im Lichte seines Vorverständnisses um. Albert hatte gar nicht an die Beschleunigungsphase gedacht. Er wollte die Kraft an der erzielten Endgeschwindigkeit messen. Lehrer und Schüler reden hier aneinander vorbei.

Peter schlägt vor, eine bekannte Beschleunigung zu nehmen, z.B. die Erdbeschleunigung. Man könne über eine Umlenkrolle ein Gewicht an einem Wagen befestigen. Dieser werde dann mit g beschleunigt. Der Lehrer geht auf den letzten Punkt nicht ein, greift aber die Grundidee der Anordnung gerne auf.

Lehrer Konzentrieren wir uns im Moment erstmal darauf, wie wir verschiedene Kräfte realisieren. Und da hat Peter gesagt, man könnte ein Gewicht nach unten sinken lassen und über ein Band an dem Wagen befestigen. Schreiben wir erstmal auf, wie wir das machen könnten. (geht zur Tafel) Oder was wolltest du sagen, Otfried?

Otfried Man könnte ein Gewicht aus einer bestimmten Höhe auf eine Waage fallen lassen. Die müßte dann doch stärker ausschlagen, wenn man das aus immer größerer Höhe fallen läßt.

Lehrer Was willst du damit erreichen?

Otfried Die Kraft irgendwie messen.

Lehrer Wir hatten uns aber eben doch überlegt, daß wir mit einer Kraft etwas beschleunigen wollen. Was beschleunigst du denn da?

Otfried Vielleicht kann man auf etwas anderes zurückschließen.

Lehrer Man könnte natürlich an der Waage ablesen, wie weit sie im höchsten Moment ausschlägt, aber -

Ralf Das könnte man wahrscheinlich nur schlecht ablesen.

Robert Vielleicht, daß man da so eine schiefe Ebene schafft und einen Wagen runterfahren läßt mit verschiedenen Gewichten. Ich meine der Versuch wird wahrscheinlich so ähnlich ausfallen wie der vor Peter. Aber das wäre vielleicht eine Alternative dazu.

Otfrieds Versuchsvorschlag läuft darauf hinaus, die Kraft zu messen, die ein Körper nach einem Fall aus verschiedenen Höhen "hat". Er entspricht den im ersten Beispiel geschilderten Experimenten mit an Experimentierwagen angehängten Kraftmessern. Es gehört zu den Grundideen von Schülern in SVUs, die 'Kraft' eines bewegten Körpers direkt anhand der Streckung oder Stauchung einer Feder zu bestimmen.

Obwohl die Vorschläge der Schüler mehrheitlich auf die Messung von 'Kräften' hinausliefen, die Körper aufgrund ihrer Bewegung "haben", wurde schließlich - ohne daß über die grundsätzliche andere dahinterstehende Idee von Kraft als

Kennzeichnung äußerer Einwirkungen (intensive Größe) - die über einen Zeitraum hinweg am Körper angreift, herauszuarbeiten - Peters Vorschlag durchgeführt und daran der Satz $F = m \cdot a$ abgeleitet.

*

Ein wichtiges Argument, das Schüler für die Abhängigkeit der Kraft von der Geschwindigkeit ins Feld führen, lautet: Ein Stein, der aus großer Höhe auf den Boden fällt, hat eine stärkere Wirkung als einer, der aus geringer Höhe fällt. Der erste Stein hat eine größere Geschwindigkeit als der zweite. Da seine Wirkung stärker ist, muß er mehr Kraft haben (bzw. tritt mehr Kraft auf), also ist Kraft proportional zur Geschwindigkeit. Kraft proportional zur Beschleunigung wäre unsinnig, da beide Steine mit g beschleunigt werden und die Kraft demnach gleich wäre. In nahezu allen vom Verfasser begleiteten Kursen wurde diese Frage von Schülern angesprochen.

Wir zitieren aus dem gleichen Leistungskurs wie in der vorangehenden Fallstudie. Es geht einige Stunden später um die Frage, ob $F = m \cdot a$ eine sinnvolle Festlegung der Kraft sei oder ob $F = m \cdot v$ angemessener sei.

Rolf Also - hm - es ist doch ein Unterschied, wenn eine Masse von einem Meter auf den Erdboden fällt oder von 1000 Metern. Da müßte doch F gleich m mal v sein; sonst wäre das ja gar nicht sinnvoll, wenn man die Masse hat und die Beschleunigung. Die Beschleunigung, wenn sie nur eine Sekunde dauert, macht doch eine viel kleinere Geschwindigkeit als wenn die - na, sagen wir - eine Stunde dauert. Meiner Meinung nach müßte es heißen: F proportional m mal v und nicht mal a .

Lehrer F proportional m mal v . Ja, laßt uns das doch einmal an diesem Beispiel diskutieren. Du meinst, da fällt ein Körper - sagen wir mit einer Masse 1 Kilogramm - einmal aus einem Meter Höhe runter und knallt auf den Boden und einmal aus 10 Metern Höhe. Und es geht hier jetzt worum? Um die Kraft, die dieser Körper jetzt auf den Boden ausübt?

Rolf Ja.

Der Lehrer unterstellt Rolf, er meine die (mittlere) Kraft, die der fallende Körper auf den Boden ausübt. Rolf hat das Phänomen so differenziert aber wohl nicht durchdacht. Sein Gefühl sagt ihm, daß die "Wucht" des Aufpralls von der Geschwindigkeit, also von der Fallhöhe abhängt. Ob die 'Kraft', die er über $F = m \cdot v$ berechnen möchte, sich auf den Bewegungsschwung vor dem Aufprall bezieht oder auf die während des Aufpralls auf die Erde ausgeübte Kraft, bleibt dabei zunächst offen. Der Lehrer greift das Beispiel auf, um es im Rahmen des vorher besprochenen Newtonschen Kraftkonzepts zu interpretieren. Wenn der Zeitraum der Impulsänderung beim Stoß mit der Erde oder die Eindringtiefe in

etwa konstant bleiben, ist die mittlere Kraft, die vom Körper auf den Boden ausgeübt wird abhängig von der Aufprallgeschwindigkeit.

Lehrer Wie können wir das Beispiel dazu nutzen, um die Formel $F = m \cdot a$ zu bestätigen oder plausibel zu machen? Oder ist es tatsächlich richtig, was Rolf gesagt hat, nämlich F proportional m mal v ?

Tom Ja, jetzt erstmal eine Frage. Und zwar: Meinst du jetzt die Kraft, mit der er aufschlägt, oder die Kraft, mit der er vor dem Fall am Faden zieht?

Lehrer Nein, da ist kein Faden. Rolf hat nur einen Körper, der runterfällt. So habe ich das verstanden.

Tom unterscheidet in seiner Nachfrage zwischen der Kraft, die ein Körper, der an einem Faden hängt, auf den Befestigungspunkt ausübt, und der Kraft "mit der" der Körper aufschlägt. Das genau ist Rolfs Problem: Er verwendet die Beziehung $F = m \cdot a$ zur Berechnung der "Bewegungskraft", die beim Stoß eine ihrem Betrage entsprechende Wirkung zeigt, und stellt fest, daß diese dann von der Fallhöhe unabhängig wäre. Das widerspricht dem gesunden Menschenverstand. Also ist $F = m \cdot v$ sinnvoller.

Rolf Ja, ich habe gesagt, die Masse von dem Körper bleibt immer gleich; der fällt ja mit einem Kilo aus 1 oder 10 Meter Höhe. Und a bleibt ja auch immer das gleiche - das ist ja die Erdbeschleunigung - hm - Erdanziehungskraft, diese 9,81. Dann müßte die Kraft ja auch gleich sein. Das ist doch aber ein Unterschied, ob ich mit einem Hammer ganz leicht aufschlage oder ob man so richtig Schwung holt.

Lehrer Darf ich mal was dazwischen sagen?! Wir müssen uns im klaren darüber sein, was wir mit F , m und a bei diesen Vorgängen meinen - für welche Größen das eigentlich gilt. Das geht im Moment durcheinander. Das will ich einmal nur so sagen.

Kai Ja, ich meine, der Körper beschleunigt ja mit 9,8 Meter pro Sekunde. Der wird ja immer schneller; dann wird die Kraft natürlich auch immer größer, weil es ja proportional ansteigt. Das heißt ja nicht, daß er immer gleich aufkommt. Je länger er fliegt, desto größer wird auch die Kraft, wenn er aufkommt.

Kai spricht ebenso wie vorher Tom von der Kraft, die der Körper beim Aufprall hat. Der Körper akkumuliert während seines Falls mit steigender Geschwindigkeit Kraft, die er dann ausübt.

Wenn im Unterricht die Beziehung $F = m \cdot a$ eingeführt wird, bereitet es Schülern meist keine Probleme sie in Aufgaben, bei denen es um die Beschleunigung eines Körpers aus dem Ruhezustand geht, korrekt anzuwenden. Damit ist der Clusterbegriff noch nicht aufgebrochen. Die Schüler stoßen auf Probleme, wenn sie die Formel auch in Situationen heranziehen wollen, in denen sie Facetten des Clusterbegriffs aktivieren, die physikalische mit den Begriffen Impuls oder Energie korrespondieren. Solche Situationen können auf dem Wege der Aneignung

des Newtonschen Kraftbegriffs fruchtbar sein, wenn sie dazu führen, daß Schüler durch ihr Scheitern die im Vergleich zum Clusterbegriff eng begrenzte Bedeutung und Anwendbarkeit des Newtonschen Konzepts erkennen. Ein Beispiel für einen solchen Lernprozeß schildern wir in einer Fallstudie in Kapitel E (Punkt E.3).

B.3.3.2.3 Präkonzepte 3-2 und 3-3: Kraft und Bewegungsantrieb

P3-2: Wenn ein Körper sich bewegt, wirkt eine Kraft in Richtung der Bewegung. Ein Körper bewegt sich, solange die Bewegungs- bzw. Antriebskraft in der Lage ist, die Bewegungswiderstände zu überwinden.

P3-3: Wirken mehrere Kräfte auf einen Körper ein, so bewegt er sich in Richtung der resultierenden Kraft.

Grobstruktur und Bedeutung der Vorverständniselemente

Die Präkonzepte 3-1 ("Bewegte Körper haben Kraft") und 3-2 klingen zunächst sehr ähnlich. Während bei P3-1 die 'Kraft' jedoch die Fähigkeit zur Einwirkung auf andere Körper ausdrückt, ist bei P3-2 eine 'Kraft' gemeint, die den Antrieb bewirkt. Wenn kein externer Bewegter vorhanden ist, besteht die Antriebskraft in einer vom Körper nach Präkonzept 3-1 gespeicherten 'Kraft'. Dazu eine Schüleraussage: "Kinetische Energie hat der Wagen, wenn er sich bewegt - die sogenannte Antriebskraft". Bei Fehlen oder Fortfall eines externen Antriebs wird die Bewegung des Körpers eine gewisse Zeit lang durch seine gespeicherte Kraft aufrechterhalten. Diese verbraucht sich im Verlaufe der Bewegung, und der Körper kommt zur Ruhe, wenn die Antriebskraft sich nicht mehr gegen die Bewegungswiderstände durchsetzen kann.

Wirken auf einen Körper verschiedene 'Kräfte' ein, dann überlagern sie sich zu einer Gesamtkraft, die in Richtung der Bewegung weist (Präkonzept 3-3). Zu den einwirkenden 'Kräften' werden reale äußere Kräfte ebenso gezählt wie die Kraft, die aus der Eigenbewegung des Körpers resultiert (vgl. P3-1). Teilweise werden Geschwindigkeitsvektoren $\vec{v}$ in "Geschwindigkeitskräfte" $\vec{F}_v$ uminterpretiert und zu realen Newtonschen Kräften in Kräfteparallelogrammen vektoriell addiert. Eine extreme Form des Präkonzepts 3-3 besteht darin, die Bewegungsrichtung mit der Richtung der stärksten Kraft (dem "Gewinner" des Kräftewettstreits) zusammenfallen zu lassen.

Die Präkonzepte 3-2 und 3-3 bleiben auch nach Behandlung der physikalischen Begriffe Impuls, Kraft und Energie als Verhaltensdispositionen bestehen. Sie werden besonders dann aktiviert, wenn es um qualitative Beschreibungen von Bewegungsabläufen in mehreren Dimensionen geht und eine gekrümmte Bahnkurve vorgegeben ist. Die Nähe der Präkonzepte zu den Impetustheorien wird unter Punkt D.2.2 im Kapitel zur Geschichte des Kraftbegriffs herausgearbeitet.

Die Bedeutung der Vorverständniselemente besteht in der Verursachung von Lernschwierigkeiten bei den Newtonschen Axiomen. Aus dem Aktivitätsdenken (Denk-

rahmen 6; B.3.2.2.2) rührt die Konzentration der Schüler auf "aktiv" wirkende 'Kräfte' her, die den Fortgang einer Bewegung sichern "sollen". Bewegungswiderstände wie Luftwiderstand und andere dissipative Reibungseffekte werden oft als natürliche Gegebenheiten hingenommen; sie werden nicht als gleichberechtigt und gleichrangig wirkende Kräfte ins Auge gefaßt. Unter Aktivitäts- und Zweckgesichtspunkten (vgl. Denkraahmen 7, B.3.2.2.3) ist eine Betrachtung der "produktiven" Antriebskräfte naheliegender als die Betrachtung der Summe aller Kräfte einschließlich der Widerstandskräfte. Für die ersteren muß "man" sorgen, während die Widerstände ohne eigenes Zutun auftreten. Sie dienen keinem sinnvollen Zweck, sondern sind lediglich dazu da, um überwunden zu werden.

Dem newtonschen Denken liegt eine solche Einteilung fern. Alle einwirkenden Kräfte werden gleichberechtigt bilanziert. Der Satz $\vec{dp} = \vec{F} dt$ bezieht sich auf die resultierende Kraft. Schüler, die die Aussage hören "Greift an einem Körper keine Kraft an, so bewegt er sich geradlinig, gleichförmig weiter", interpretieren "keine Kraft" als "keine Antriebskraft". In dieser Interpretation widerspricht die Aussage jeglicher Erfahrung mit Bewegungsabläufen. Manche Schüler beschränken ihre Gültigkeit daher auf ideale Bedingungen, wie sie im Weltraum herrschen oder im Labor simuliert werden können. (Schüleraussagen zum ersten Newtonschen Axiom werden unter Punkt D.3.4.2 diskutiert.)

Im Unterricht muß der Unterscheidung zwischen den Einzelkräften und der Resultierenden deshalb mehr Beachtung geschenkt werden. Die Einführung der Proportionalität zwischen Kraft und Beschleunigung über Beschleunigungsexperimente auf Luftkissenfahrbahnen verleitet dazu, den Spezialfall $\vec{F} = 0$ mit $\vec{v} = \text{const.}$ auf ideale Fälle zu beziehen, bei denen am Körper überhaupt keine (Einzel-) Kraft angreift. In aller Regel bedarf es zum Aufrechterhalten einer gleichförmigen Bewegung jedoch einer Antriebskraft, da haben die Schüler vollkommen recht. Ein Widerspruch zur Newtonschen Theorie besteht erst dann, wenn man davon ausgeht, daß eine resultierende Kraft in Bewegungsrichtung zeigen muß. Leider findet man in Schulbüchern Formulierungen, die eine solche Vorstellung fördern. Es wird davon gesprochen, Antriebskräfte müßten Reibungskräfte "überwinden". Die Entscheidung, ob Schüler von einer "Netto"-Kraft in Bewegungsrichtung ausgehen oder von einer Einzelkraft, ist manchmal schwer zu treffen.

Feinstruktur und Diskussion der Elemente an Beispielen

Kraft und Bewegungsrichtung bei Bewegungen in 2 Dimensionen

Die Präkonzepte 3-2 und 3-3 wirken sich besonders bei Bewegungen in mehr als einer Dimension aus. Bei eindimensionalen Bewegungen können die Dispositionen verdeckt bleiben, wenn die Richtungen von Kraft, Geschwindigkeit und Beschleunigung, wie in vielen Standardbeispielen, zusammenfallen. Eine interessante eindimensionale Bewegung ist der vertikale Wurf. Wir wollen Bewegungen in zwei Dimensionen diskutieren: waagerechter Wurf und Kreisbewegung. Beginnen wir mit einigen Schüleraussagen zum waagerechten Wurf. Sie sind ohne Erläuterungen zur jeweiligen Unterrichtssituation verstehbar.

"Die Erdanziehung ist immer gleich. Also, die ist immer konstant. Und wenn die Kugel jetzt fliegt, dann läßt die andere Kraft (in der Waagerechten, d. Verf.) doch nach. Deshalb fällt die Kugel ja auch herunter. Wenn die gleichbleiben würde, dann würde sie ja immer weiter geradeaus fliegen."

"Ich würde sagen, beide Bewegungen stehen in einem Verhältnis zueinander, die waagerechte und die senkrechte nach unten. Je kleiner die eine wird, desto größer wird der Einfluß der anderen. Das heißt jetzt nicht, daß die Erdanziehungskraft irgendwie zunimmt - das Verhältnis ändert sich nur. Zuerst ist im Verhältnis die waagerechte und danach die Erdbeschleunigung größer."

"Bis zu einem gewissen Punkt geht die Kugel waagerecht, bis die Anfangsbeschleunigung nicht mehr ausreicht, um die Kugel vor der Erdanziehungskraft zu bewahren, weil dann - dann wird sie ja angezogen, und dann geht es halt runter."

"Ich würde sagen, grundsätzlich wird die Kugel ja abgebremst, und darum fällt sie runter. Die fällt von Anfang an. Die wird ja von Anfang an von der Luft abgebremst. Die bleibt nicht in der Waagerechten. Nur ist das nicht zu messen."

"Ein Körper, der senkrecht nach unten fällt, wird von der Kraft, die bei der geworfenen Kugel waagerecht dazu wirkt, nicht beeinflusst."

"Wenn man die Kugel ein bißchen schräg nach oben abschießen würde, dann würde auch eine Kraft nach oben wirken."

Gemeinsam ist den sechs Aussagen, die von Schülern aus verschiedenen Kursen stammen, daß die waagerecht abgeworfene Kugel sich jeweils in Richtung einer angenommenen Resultierenden aus Erdanziehungskraft und 'Horizontalkraft' bewegt. Das Einsetzen der Fallbewegung wird in den Aussagen 1 bis 4 auf eine Abnahme der horizontal wirkenden 'Kraft' zurückgeführt. Der dritten Aussage unterliegt eine Extremform des Präkonzepts 3-3, bei der die Bewegungsrichtung durch die jeweils stärkste Einzelkraft bestimmt wird. Diese Vorstellung, die an Darstellungen in Comic-Filmen erinnert, wird nur in sehr spontanen Einfällen geäußert und schnell wieder aufgegeben. In einem Fall wurde sie mehr scherzhaft eingebracht:

- S 1 Die Kugel fliegt erst geradeaus und dann senkrecht runter.
S 2 Genau! Wie bei Tom und Jerry. (Zeichentrickserie)

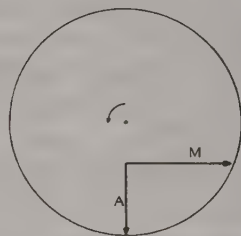
Parallelen zu Vorstellungen der Impetustheorien sind offenkundig. Im Rahmen ihrer historischen Darstellung schildern wir ein weiteres Unterrichtsbeispiel zur Wurfbewegung (siehe Punkt D.2.2).

*

Für die Auswirkungen der Präkonzepte 3-2 und 3-3 bei der Beschreibung von Kreisbewegungen greifen wir erneut auf eine Unterrichtsstunde zurück, in der Schüler die Bewegung einer Kugel diskutieren, die - auf einer rotierenden Scheibe liegend - an einem Faden im Kreis herumgeführt wird. Es werden Protokollauszüge aus einem Leistungskurs zitiert. Zu beachten ist der jeweils hergestellte Zusammenhang zwischen den postulierten 'Kräften' und der Bewegungsrichtung.

Im Ausschnitt wird über die Bahn der Kugel nach Durchschneiden des Fadens gesprochen. Es liegen bereits Vorschläge von Markus (M) und Arnim (A) vor. Der Versuch ist noch nicht ausgeführt worden. Die Frage des Bezugssystems ist noch nicht aufgekommen.

Ludwig Ich bin für A, weil, wenn die Kugel am Faden wäre, müßte sie sich um den Mittelpunkt drehen. Die einzige Kraft, die auf die Kugel wirkt, ist ja eine Kraft weg vom Mittelpunkt der Scheibe. Und da kann doch nicht plötzlich, wenn der Faden durchgeschnitten wird, eine ganz andere Kraft auftreten, die die Kugel da irgendwie - - (bricht ab)



Ludwig legt das Laborsystem zugrunde: "Am Faden müßte die Kugel sich um den Mittelpunkt drehen".

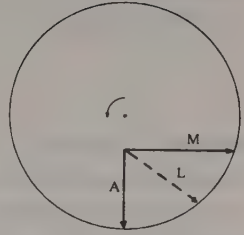
Das Präkonzept 3-2 fungiert nicht, sonst müßte Ludwig in tangentialer Richtung eine Kraft annehmen. Er sieht nur eine Kraft nach außen. Daher ist die Bewegungsrichtung nach Durchschneiden des Führungsfadens durch diese Kraft bestimmt.

Detlev Ich bin für die Möglichkeit M, weil, wenn die Kugel sich im Kreis dreht, hat die an einem bestimmten Punkt eine Geschwindigkeit in dieser Richtung. Wenn die Scheibe sich linksherum dreht, hat die Kugel an dem Punkt doch eine Geschwindigkeit nach rechts.

Lorenz Vielleicht müßte man zwischen A und M in der Mitte noch eine Bahn zwischenziehen. Da Wirken zwei Kräfte: einmal die Kraft, die die Kugel nach außen drückt und einmal die Kraft, die Detlev gezeigt hat.

Lehrer Wenn du meinst, zeichne das ein.

Lorenz (geht zur Tafel, zeichnet) Hier wirkt jetzt eine Kraft auf die Kugel, weil der Faden ja stramm ist (zeigt in Richtung von Pfeil A). Und dann die von Detlev, diese Kreis- - diese hier (deutet auf Pfeil M). Wenn man das so zusammensieht, kann man hier so in der Mitte - (zeichnet Pfeil L)



Detlev, der nicht unter Zuhilfenahme von Kräften argumentiert, kommt zu einer für das Inertialsystem

korrekten Vorhersage. Lorenz interpretiert Detlevs Aussage so, als habe der von einer Kraft in tangentialer Richtung gesprochen (P3-2). Diese addiert Lorenz quasi vektoriell zu der postulierten Kraft nach außen und legt die Bewegungsrichtung in Richtung der Gesamtkraft (P3-3).

Ludwig, der in seiner ersten Stellungnahme nicht von einer Kraft in Richtung von M gesprochen hatte, schließt sich, nachdem der Versuch durchgeführt worden ist, Lorenz' Idee an.

Ludwig Es wirkt einmal die Fliehkraft nach außen und die Tangente zu der Kreisbewegung. Da müßte sich eigentlich aus den beiden Kräften die Bewegung zusammensetzen. Die Bahn müßte zwischen den beiden Kräften verlaufen.

Ludwig formuliert hier fast wörtlich das Präkonzept 3-3. Der nächste Schüler nimmt gegen die bisherigen Erklärungen Stellung. Claus arbeitet bei seiner Beschreibung mit dem Trägheitsprinzip.

Claus Ich meine, daß da keine Fliehkraft ist. Ich weiß nicht, was das ist. Das ist irgendwie die Trägheit der Kugel, die die Richtung der Geschwindigkeit, die sie gerade erhalten hat, immer beibehalten will. Weil das so eine Kreisbahn ist, will die Kugel ihre Geschwindigkeit, die sie kurz vor dem Durchschneiden bekommen hat, beibehalten.

Lehrer Wenn man das Trägheitsprinzip anwendet, so wie Claus, was wirken dann für Kräfte auf die Kugel, solange die am Faden ist?

Detlev Die Geschwindigkeit der Scheibe.

Lehrer Ist das eine Kraft?

Detlev Ja.

Ludwig Die Kraft geht in jedem Punkt in die Richtung einer Tangente auf die Kreisbahn.

Die Annahme einer 'Tangentialkraft' wurde von verschiedenen Schülern über einen längeren Zeitraum verfochten. Sie wurde durch Äußerungen des Lehrers oder von Claus und Arnim, die als einzige die Newtonschen Prinzipien auf das Problem anzuwenden versuchten, zeitweise überdeckt und nicht mehr geäußert. Zu späteren Zeitpunkten, z.B. zu Beginn einer neuen Unterrichtsstunde, kam die

Argumentationslinie, daß in der jeweiligen Bewegungsrichtung eine Kraft wirke, jedoch immer wieder zum Tragen.

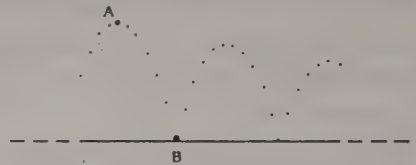
*

Besonders interessante Beiträge zur Diskussion der Präkonzepte 3-2 und 3-3 ergibt die Auswertung der Denkaufgabe B1 des Tests DAM, die wir nebenstehend noch einmal abgedruckt haben. Die Aufgabe erwies sich als das schwierigste Item des Tests. Nur 13 von 254 Schülern (5,1%) zeichneten in A und B die richtigen Kraftpfeile ein (siehe dazu B.2.2.2). Bei Beschränkung auf Punkt A liegen 39 richtige Antworten vor (15,4%). 20 Schüler lösten Teil B korrekt

Ein Ball beschreibt die in der Zeichnung angegebene Bahn von links nach rechts.

Zeichnen Sie die Kräfte ein, die am Ball in den Punkten A und B angreifen!

Deuten Sie durch die Länge der Pfeile grob die Stärken der Kräfte an! Versehen Sie möglichst jede Kraft mit einer Bezeichnung!



(7,9%). Zur Vereinfachung wurde nicht berücksichtigt, ob in Punkt B die (mittlere) elastische Kraft des Bodens auf den Ball größer eingezeichnet wurde als die Gravitationskraft. Selbst bei Lösungen mit korrekten Pfeilen verrieten einige Bezeichnungen der Pfeile, daß über die Natur der Kräfte nicht immer newtonsche Vorstellungen bestanden (z.B. "Spannenergie", "Kraft, mit der sich der Ball am Boden abstößt").

Die Ergebnisse sind in auf Seite 301 wiedergegeben (Tabelle). Zwischen Grund- und Leistungskursschülern bestehen nur geringe Unterschiede im Antwortverhalten. Der Geschlechtervergleich zeigt größere Differenzen, auf die wir aber wegen der sehr unterschiedlichen Stichprobengrößen (188 Bearbeitungen durch Jungen, 39 durch Mädchen) nicht eingehen.

Häufigster Fehler bei Teil A ist das Einzeichnen eines Pfeils in horizontaler Richtung - der momentanen Bewegungsrichtung (Präkonzept 3-2). In zahlreichen Gesprächen, die im direkten Anschluß an die Befragung 2 mit Schülern durchgeführt wurden, bereitete dieser Punkt große Verständnisschwierigkeiten. Argumentationen auf der Grundlage der Newtonschen Axiome wurden sehr zurückhaltend aufgenommen. Der typische Einwand gegen die Streichung der "Vorwärtskraft" lautete, wenn die nicht da wäre, würde der Ball senkrecht nach unten fallen.

Die horizontalen Pfeile wurden sehr unterschiedlich bezeichnet: "F", "F_v", "v",

Pfeilrichtung	Teil A					Teil B				
	Gesamt	LK	GK	männl	weibl	Gesamt	LK	GK	männl	weibl
horizontal	61,3	61,0	61,6	62,2	53,9	49,1	51,1	47,4	53,1	35,3
nach unten	93,2	93,3	91,6	92,5	97,5	56,9	67,8	48,3	59,2	44,1
nach oben	13,6	14,3	13,0	15,4	7,7	57,9	53,3	61,3	59,8	53,0
schräg rechts unten	14,1	16,2	12,4	16,0	5,2	10,3	12,2	8,7	11,1	8,9
schräg rechts oben	11,9	11,4	13,0	10,1	20,5	24,0	22,2	25,5	24,1	23,5
gegen den Ball	4,2	3,8	4,6	3,2	7,7	2,5	3,4	1,8	3,1	0,0
andere Richtungen	2,6	2,0	3,0	2,6	2,5	1,5	2,3	0,9	1,2	2,9
nicht beantwortet	7,5	2,8	11,0	5,5	17,0	19,7	16,7	21,9	18,6	27,7
N_G (Gesamt)	254	108	146	199	47	254	108	146	199	47
N_A (Antwortende)	235	105	130	188	39	204	90	114	162	34

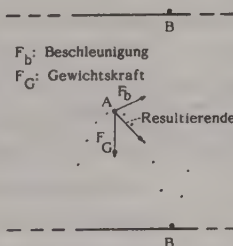
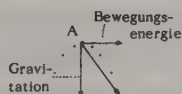
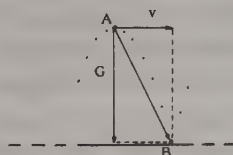
*: Die Prozentangaben beziehen sich auf die Zahl der Antwortenden (N_A)

Tabelle: Ergebnisse zu Aufgabe B1 des Tests DAM

"F in Wegrichtung", "Bewegungskraft", "Trägheitskraft", "Impuls", "Schwung des Balls", "Horizontalbeschleunigung", "Bewegungsenergie". (Der Aufgabentext weist betont darauf hin, daß nur Kräfte eingezeichnet werden sollen.) v-Pfeile und "Energie"-Pfeile wurden mit der Gravitationskraft problemlos vektoriell zusammengefaßt. Drei Beispiele sind nebenstehend angeführt.

Die Vektoraddition horizontaler und vertikaler Pfeile trat häufig auf - zum Teil mit einem gekrümmten Pfeil als Resultierender. 14,1% der Antworten beinhalten bei Punkt A einen Pfeil nach schräg rechts unten. Auch in Fällen, bei denen der "Summenpfeil" fehlt, kann man davon ausgehen, daß die eingezeichneten Horizontal- und Vertikalpfeile sich in der Vorstellung der Schüler zusammenfügen und so den absteigenden Ast der Sprungbewegung ergeben. Es fungiert das Präkonzept 3-3, nach dem die Bewegung in Richtung der Gesamtkraft erfolgt.

Es steht zu vermuten, daß bei Fungieren des Präkonzepts 3-2 Schüler Geschwindigkeitsvektoren, die z.B. in Tafelzeichnungen auftreten, in "Bewegungskräfte" umdeuten, also $\vec{v}$ als $\vec{F}_v$ sehen. Dazu als Einschub ein kurzer Beleg aus dem Protokoll einer Unterrichtsstunde zur vektoriellen Addition von Geschwindigkeiten am Beispiel der Flußüberquerung durch einen Schwimmer quer zur Strömungsrichtung. Ein Schüler gab den Inhalt der Stunde folgendermaßen wieder:



"Wir wollten wissen, ob - wenn eine waagerechte und eine senkrechte Kraft wirken - ob das eine gemeinsame Geschwindigkeit gibt und ob man die ausrechnen kann oder ob das zwei getrennte Geschwindigkeiten sind."

In der Stunde selbst war an keiner Stelle über Kräfte gesprochen worden. In den Zeichnungen waren nur v-Pfeile enthalten gewesen.

Zurück zur Denkaufgabe B1. Für die erfolgreiche Lösung der Aufgabe gibt es zwei Strategien: 1. die Bahnkurve betrachten und Pfeile in Richtung der Impulsänderung eintragen oder 2. die wechselwirkenden Körper bestimmen und Kraftpfeile in deren Wirkungslinie (Erde - Ball) einzeichnen. Bei Teil A sind beide Strategien gleichwertig, während in Teil B die Strategie 1 einfacher ist. Strategie 2 verleitet zu einer Verkomplizierung des Problems: Man kann nur eine mittlere elastische Kraft Erde $\rightarrow$ Ball einzeichnen und es könnten Reibungskräfte angenommen werden. Die vertikalen Pfeile bei A (93,2%) sind jedoch vermutlich nicht auf ein systematisches Vorgehen nach einer der beiden Strategien zurückzuführen (dem widerspricht z.B. der große Anteil horizontaler Pfeile), sondern auf die Allgegenwärtigkeit des Gewichts bzw. der Gravitationskraft, deren Annahme in Punkt A sehr nahe liegt, da der Ball nach unten fällt. Im Punkt B wurden nach unten gerichtete Pfeile seltener eingezeichnet (56,9%; das sind 36,3% weniger als bei A). Die Abnahme der Prozentzahlen ist dadurch erklärbar, daß der Ball ab Punkt B wieder nach oben geht und die Richtungen von Bewegung und Gravitationskraft damit gegenläufig sind.

57,9% der Schüler, die Teil B bearbeiteten, zeichneten einen Pfeil nach oben. Er tritt meist gemeinsam mit einem horizontalen Pfeil auf. Die beiden 'Kräfte' zusammen bestimmen die neue Bewegungsrichtung. Teilweise sind die Pfeile wieder zu einer Resultierenden nach schräg rechts oben zusammengesetzt. Als Bezeichnungen der nach oben gerichteten Pfeile wurden gewählt: "Spannkraft", "Spannenergie", "Gegenkraft zur Gewichtskraft", "Kraft mit der sich der Ball am Boden abdrückt", "Verformungskraft", "Aufprallkraft", "Impulskraft", "Rückstoß der Erdanziehungskraft". Aus der Namensliste geht hervor, daß einige Schüler das Abdrücken des Balles vom Boden als Aktivität des Balles auffassen und nicht als Kraftwirkung der Erde auf den Ball. Das entspricht dem Aktivitätsschema (vgl. Denkrahen 6) und seiner spezifischen Ausprägung im Präkonzept 4 (siehe Punkt B.3.3.2.4).

Die Aufgabe B1 erwies sich als ausnehmend schwierig. Die Auswertung zeigt eine Übereinstimmung unserer Ergebnisse mit denen von Jung (1981a) und Warren (1979), von dem die Aufgabe ursprünglich stammt. Das Präkonzept 3-2, es wirke in Richtung der Bewegung eines Körpers immer eine 'Kraft' (61,3% horizontale

Pfeile an der Stelle A), ist eines der dominantesten Elemente des Vorverständnisses zur Mechanik. Seine Problematisierung setzt voraus, daß die Schüler sich der Vorstellung zunächst bewußt werden. Dafür sind Denkaufgaben geeignet. Ein Einsehen in die Spezifika des Newtonschen Kraftkonzepts wird weniger über Anwendungen der Formel $F = m \cdot a$ in Rechenaufgaben in die Wege geleitet als über das ausführliche Besprechen solcher Denkaufgaben.

*

Bewegungsverlauf nach Fortfall des Bewegers

Zwei weitere Aufgaben der Erhebung DAM betreffen den Zusammenhang zwischen Bewegung und Kraft bzw. Beweger. Die Aufgabe C des Tests basiert auf einem Beispiel, an dem Galilei im 'Dialog über die Weltsysteme' sein Trägheitsprinzip entwickelt (vgl. Punkt D.3.3). Es geht um die Landestelle eines Steines, der von der Mastspitze eines fahrenden Schiffes fällt. In unserer Aufgabe werden zwei "Aussagen zur Bewegungslehre" vorgestellt, die einen aristotelischen und einen newtonschen Standpunkt umschreiben. In den Abschnitten b) und c) werden die Schüler nach den Landestellen des Steines gefragt, die sich bei Zugrundelegung der beiden Aussagen ergeben, sowie nach der - ihrer Meinung nach - tatsächlichen Landestelle.

Lesen Sie die beiden folgenden Aussagen zur Bewegungslehre durch:

- I "Ein in Bewegung befindlicher Körper kommt zum Stillstand, sobald die Kraft, die ihn vorantreibt, nicht mehr in der für den Antrieb erforderlichen Weise wirken kann."
- II "Jeder Körper behält eine ihm einmal verliehene Geschwindigkeit, solange er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Bewegungszustand zu ändern."

a) Stellen Sie den prinzipiellen Unterschied zwischen den beiden Aussagen heraus! Verdeutlichen Sie durch Beispiele!

b) Welche Konsequenzen haben diese Aussagen für den folgenden Versuch:

Bei einem fahrenden Schiff wird ein Stein von der Mastspitze fallengelassen.

Wo landet der Stein nach Theorie I und wo nach Theorie II?

c) Wo würde der Stein in dem oben genannten Versuch tatsächlich auftreffen?



(Wenn Sie wollen, können Sie die Landestelle in der Zeichnung eintragen)

Die Antworten zu Abschnitt a) der Aufgabe werden an anderer Stelle besprochen (siehe Punkt D.3.4.2). Bei Zugrundelegung von Aussage I müßte eine Landestelle in der Nähe des Hecks eingezeichnet werden. Das Schiff fährt unter dem Stein weg. Der Stein verliert seine Vorwärtsbewegung, weil der Kontakt zum Beweger Mast weggefallen ist. Bei Aussage II und als tatsächliche Landestelle ergibt sich ein Punkt am Mastfuß, da der Stein die Horizontalkomponente seiner Geschwindigkeit beibehält. Bei Annahme von Luftreibungskräften wäre eine geringe Verschiebung vom Mastfuß weg zulässig.

eingezeichnete Landestelle	Aussage I ("Aristoteles")			Aussage II ("Newton")			tatsächliche Landestelle		
	Ges.	LK	GK	Ges.	LK	GK	Ges.	LK	GK
Fußpunkt Mast	28%	23%	32%	65%	63%	65%	39%	40%	39%
Richtung Heck	66%	72%	59%	30%	34%	26%	59%	60%	59%
sonstige	5%	5%	7%	5%	3%	8%	0%	0%	0%
N_A (Antwortende)	188	85	103	186	85	101	188	84	104
nicht beantwortet	26%	21%	29%	27%	21%	31%	26%	22%	29%
N_G (Gesamt)	254	108	146	254	108	146	254	108	146

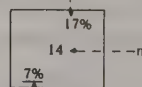
Tabelle: Ergebnisse zu Aufgabe C (Teile b und c) des Tests DAM

Ein Viertel der Schüler beantwortete die Abschnitte b) und c) von Aufgabe C nicht. Dies ist im Vergleich zu anderen Aufgaben des Tests DAM ein hoher Anteil. Die Zahl der Nichtbeantwortungen ist in Grundkursen größer als in Leistungskursen. Insgesamt sind die Unterschiede im Antwortbild zwischen den Kursarten aber vernachlässigbar.

Bei den Fragen zur Landestelle nach den Aussagen I ("Aristoteles") und II ("Newton") geben jeweils zwei Drittel die richtige Antwort. Wie die rechte Tabelle zeigt, besteht eine Tendenz, die beiden Fragen unterschiedlich zu beantworten. Die Aussagen werden als gegensätzlich erkannt. (Die folgenden Tabellen zeigen Ausschnitte aus den jeweiligen Kreuztabellen.) Für die Auswertung wurden nur Schüler herangezogen, die zumindest eine der Teilfragen beantwortet haben (194 von 254 Schülern). Die ausgelassenen Zellen der Kreuztabellen enthalten Kombinationen mit anderen Antworttypen sowie mit Nichtbeantwortungen.)

		Landestelle nach Aussage II		
		Fußpunkt Mast	Richtung Heck	
Landestelle nach Aussage I	Fußpunkt Mast	17% 14 7%	8% 30 15%	53 27%
	Richtung Heck	40% 98 51%	18% 17 9%	124 64%
		120 62%	55 28%	194

aus Randverteilung vorhergesagte relative Häufigkeit



tatsächliche relative Häufigkeit

Ein Motiv dafür, die Landestelle nach Aussage II vom Mastfuß wegzuverlagern, könnte die Annahme einer Kraftwirkung durch Gegenwind sein. Wir gehen darauf später ein (siehe unten).

Besonders interessant sind die Ergebnisse im Teil c). Danach meint die Mehrheit der Schüler (59% der Antwortenden), die Landestelle des Steines läge in Richtung des Hecks. Es wurden zu dieser Kategorie nur solche Fälle gezählt, bei denen der Landepunkt deutlich vom Fußpunkt des Mastes weg nach hinten verlagert worden war. Bei nur leichten Abweichungen wurden die Antworten zur Kategorie "Mastfuß" gezählt. Das Antwortbild zur tatsächlichen Landestelle ist dem zum Auftreffpunkt nach Aussage I ähnlicher als dem zu Aussage II.

		tatsächl. Landestelle		
		Fußpunkt Mast	Richtung Heck	
Landestelle nach Aussage I	Fußpunkt	8%	12%	
	Mast	13	26	53
		6%	12%	24%
	Richtung Heck	19%	28%	124
		48	58	
		22%	26%	56%
		74	113	222
		33%	51%	

		tatsächl. Landestelle		
		Fußpunkt Mast	Richtung Heck	
Landestelle nach Aussage II	Fußpunkt	18%	28%	
	Mast	47	51	120
		21%	23%	54%
	Richtung Heck	8%	13%	55
		11	33	
		5%	15%	25%
		74	113	222
		33%	51%	

Kreuztabellen zu den Ergebnissen zu Aufgabe C (Teile b und c) des Tests DAM

Aus den obigen Tabellen läßt sich folgendes ablesen:

- 26% der Schüler, die die Landestelle bei Aussage I in Richtung Heck verlegen, bleiben auch bei der tatsächlichen Landestelle (TL) dabei. Von denen, die bei II den Mastfuß wählen, tun dies bei der tatsächlichen Landestelle 21%.
- 23% schwenken um von II "Mastfuß" zu TL "Richtung Heck". Gleichzeitig wechseln 22% von I "Richtung Heck" zu TL "Mastfuß".
- Die Schüler beantworten Teil c) der Aufgabe (TL) ziemlich unabhängig von ihren Überlegungen zu den Landestellen nach den Aussagen I und II. Der Trägheitssatz (Aussage II) wird offensichtlich kaum zur Strukturierung des "Realproblems" in Teil c) herangezogen.

Oder liegt die Ursache für die Verlagerung der Landestelle in Richtung des Hecks vielleicht darin, daß die Schüler zwar newtonsch denken, aber eine starke Beeinflussung durch den Fahrtwind annehmen? Um dieser Frage nachzugehen, wurde ermittelt, inwieweit die Luftreibung die Überlegungen zu Abschnitt c) beeinflusst hat. Bei 40 Schülern konnte diese Frage geklärt werden, da z.B. horizontal gegen den Stein gerichtete Pfeile eingezeichnet waren oder kurze Anmer-

kungen auf den Antwortbögen standen, die erläuterten, ob der Luftwiderstand einbezogen oder explizit ausgenommen worden war. Die Ergebnisse sind rechts festgehalten.

Wie zu erwarten, verleitet die Einbeziehung des Luftwiderstands eher zur Annahme einer Landestelle in Richtung des Hecks. Dies kann im Rahmen eines newtonschen Denkens

erfolgen, aber ebenso als Verstärkung eines aristotelischen Ansatzes. Auch von den Schülern, die zu erkennen gaben, daß sie das Medium nicht berücksichtigt haben, wählten mehr Schüler einen Landepunkt in der Nähe des Hecks als am Mastfuß. Die Annahme eines Luftwiderstands ist also nicht allein für das Zustandekommen der 59% Antworten "Richtung Heck" verantwortlich.

Es gibt drei mögliche Ursachen für die Annahme, daß der fallende Stein relativ zum Schiffskörper zurückbleibt:

1. Aristotelisches Denken (keine horizontale Bewegungskraft) oder Impetusvorstellungen (Präkonzept 3-2; Aufzehren der gespeicherten Bewegungskraft im Verlaufe des Falls)
2. Probleme mit dem Bezugssystem. McCloskey (1983) fand mit Hilfe von Computersimulationen, daß Schüler Bewegungsabläufe in gleichförmig bewegten Bezugssystemen häufig falsch einschätzen (siehe dazu Punkt C.2.7)
3. Überschätzung des Einflusses der Luftreibungskraft.

Die letztgenannte Ursache kann auf ein überpointiertes Realisationsdenken (Denkrahmen 1) zurückgehen. (Überschlagrechnungen ergeben, daß erst bei einem Sturm oder Orkan, der das Schiff von vorne trifft (Windgeschwindigkeiten von mehr als 15m/s), deutlich sichtbare Auswirkungen auf die Fallbewegung des Steins auftreten.)

Es ist im einzelnen schwer zu entscheiden, welchen Anteil die 3 genannten Ursachen am Zustandekommen der 59% Antworten haben, bei denen der Stein am Heck des Schiffs aufkommt. Angesichts der 65% der Schüler, die zu Aussage II ("Newton") korrekterweise den Mastfuß als Landestelle angeben, ist der Rückgang auf 39% bei der Frage nach der tatsächlichen Landestelle zumindest ein Zeichen dafür, daß der Trägheitssatz als Strukturierungshilfe für konkrete Probleme nicht im wünschbaren Maße verwendet wird. Auch bei den Schülern, die

		Luftwiderstand		
		berücksichtigt	nicht berücksichtigt	
tatsächliche Landestelle	Fußpunkt Mast	3	7	10
	Richtung Heck	17	13	30
		20	20	40

die Verlagerung des Landepunkts aufgrund des Lufteinflusses vornehmen, wäre zu hinterfragen, ob sie tatsächlich an eine Beschleunigung im an das Schiff gebundenen Bezugssystem durch eine Reibungskraft gedacht haben.

In Besprechungen der Aufgabe wurde mehrfach geäußert, das Schiff unter dem fallenden Stein weg. Das Präkonzept 3-2 dürfte einem beträchtlichen Teil der Antworten zugrundeliegen.

*

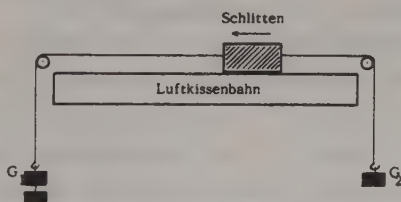
Aus den Ergebnissen zu Aufgabe B4 des Tests DAM stammt der abschließende Beleg der Präkonzepte 3-2 und 3-3. Es geht wieder um den Fortgang einer Bewegung nach Wegfall des (diesmal nur vermeintlichen) Bewegers. Bei der Aufgabe ist verschiedenes zu bedenken:

- Das Phänomen soll reibungsfrei gedacht werden. Zur Betonung sind die Worte "Luftkissenbahn" und "reibungsfrei" im Text hervorgehoben. Obwohl Luftkissenbahnen nicht reibungsfrei, sondern nur reibungsarm sind, verweist die Anordnung im Vergleich zu normalen Rollenfahrbahnen auf eine Vernachlässigung der Reibung.
- Das Gewicht der Fäden, die links und rechts verschieden lang herunterhängen können, soll vernachlässigt werden. (Nur in sehr wenigen Fällen wurde von Schülern danach gefragt.)
- Das Problem des ruckfreien Anhängens zusätzlicher Gewichtsstücke während der Bewegung bleibt ausgeblendet.
- Die Aufgabe wurde in zwei in der Wortwahl unterschiedlichen Versionen vorgelegt. (Die Gründe dafür sind unter Punkt B.3.2.2.5 ausgeführt.) Das ist für die hier anzustellenden Überlegungen aber ohne Belang.

Die Aufgabe stand zur offenen Beantwortung. Es ergaben sich 5 Antworttypen:

- 1) "Der Schlitten behält die erreichte Geschwindigkeit bei."
"Der Schlitten bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit weiter."

Ein auf einer Luftkissenfahrbahn reibungsfrei gleitender Schlitten wird von zwei entgegengesetzt gerichteten Kräften beeinflusst. Die Kräfte werden durch Gewichtsstücke hervorgerufen, die über Fäden am Schlitten befestigt sind:



Zuerst soll das Gewicht G_1 auf der linken Seite doppelt so groß sein wie das Gewicht G_2 auf der rechten Seite. Der Schlitten fährt nach links. Plötzlich wird während dieser Bewegung G_2 gleich G_1 gemacht, indem ein Gewichtsstück auf der rechten Seite dazugehängt wird.

Was geschieht nun?

- 2) "Der Schlitten bleibt sofort stehen."
- 3) "Der Schlitten rollt langsam aus."
"Der Schlitten gleitet noch ein Stück weiter und bleibt dann stehen."
- 4) "Der Schlitten pendelt sich in der Mitte der Fahrbahn ein."
- 5) "Der Schlitten gleitet zur Mitte zurück und bleibt da stehen."

Konzentrieren wir uns auf die Antworttypen 1 bis 3. (Zu den Typen 4 und 5 siehe Denkraahmen 9 "Analogiedenken"; B.3.2.2.5) 41% der Schüler gaben die erwartete Antwort des Typs 1. In Leistungskursen liegt der Anteil richtiger Antworten deutlich höher als in Grundkursen. Von Reibungseinflüssen wird, wie in der Aufgabe vorgegeben, abstrahiert. Der Trägheitssatz findet Anwendung. Das Präkonzept 3-2 fungiert bei Antworttyp 1 nicht.

Antworttyp	Gesamt	LK	GK
1) behält Geschwind. bei	41%	51%	34%
2) bleibt sofort stehen	10%	9%	11%
3) gleitet langsam aus	20%	20%	20%
4) pendelt in der Mitte ein	9%	6%	10%
5) gleitet zur Mitte zurück	12%	7%	16%
N	254	108	146

10% meinen, der Schlitten bliebe stehen. Bei Fortfall des externen Bewegers - als solcher wird der Gewichtsüberschuß auf der linken Seite vor dem Ausgleich betrachtet - kommt die Bewegung zum Stillstand. Daß das abrupt erfolgen soll, kann man als Überspitzung der Vorstellung "v prop. F" ansehen. Sie läßt sich aus Alltagserfahrungen nicht stützen, denn auch bei Bewegungen unter Reibungseinflüssen stoppt der Körper nach Wegfall der Antriebskraft nicht schlagartig.

Schüler, die antworten, der Schlitten glitte aus (20%), haben aus dem Text die Aussage "reibungsfrei gleitender Schlitten" nicht aufgenommen, bzw. es gelingt ihnen nicht, von der Reibung zu abstrahieren. Sie "sehen" das Phänomen nicht theoretisch idealisiert, sondern praktisch realisiert und gelangen zu dem dann korrekten Schluß, der Schlitten komme nach einer gewissen Zeit zur Ruhe. Eine Schülerantwort lautete:

"Durch die Trägheit der Masse wird der Wagen noch einen Moment lang weiterfahren, jedoch vermindert sich seine Geschwindigkeit, da kein Antrieb mehr vorhanden ist und die Bewegung des Wagens durch Reibung beeinflusst wird."

Hier wird die Reibung explizit genannt. Der anfänglich vorhandene Gewichtsüberschuß sorgt dann nur teilweise (wenn überhaupt) für eine Beschleunigung. Er ist in dieser Sichtweise vielmehr notwendig, um die Bewegung aufrechtzuerhalten (Präkonzept 3-2).

Das Beispiel zeigt die enge Verzahnung des Präkonzepts 3-2 mit dem Denkraahmen 1 "Realisationsdenken". Das Vorhandensein von Bewegungswiderständen wird,

der Realerfahrung entsprechend, als natürliche Bedingung vorausgesetzt. Daher ist immer ein Antrieb für den Fortgang einer Bewegung erforderlich und nach Aufbrauchen der gespeicherten Bewegungskraft (/Energie/Schwung) bleibt der Körper stehen. Es liegt keine direkte Ablehnung des Trägheitssatzes vor. Die Schüler vollziehen lediglich - trotz entsprechender Formulierung des Problems - eine idealisierte, reibungsfreie Betrachtungsweise nicht mit. In einer Nachbesprechung sagte ein Schüler: "Ja, wenn da wirklich überhaupt keine Reibung wäre, dann würde der vielleicht weiterfahren. Aber ein bißchen Reibung ist ja immer da."

B.3.3.2.4 Präkonzept 4: Kraftausübung als Aktivität

P4: Nur aktive Körper können Kräfte ausüben. Passive Körper leisten Widerstand.

Grobstruktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Bei Präkonzept 4 handelt es sich um eine spezifische Ausprägung der generellen Tendenz zur Einteilung der an einem Vorgang beteiligten Körper in aktive und passive. Zu den aktiven zählen neben den belebten Körpern auch solche, die sich in einem Spannungszustand (Feder) oder in Bewegung befinden. Sie können "wirkliche" Kräfte ausüben, d.h. mit bestimmten Zielen auf sich oder andere Körper einwirken:

- Ein Sprinter kann sich vom Startblock abstoßen, weil seine Muskeln angespannt sind.
- Eine rollende Kugel kann durch Stoß andere Kugeln in Bewegung setzen.
- Eine gespannte Feder kann andere Körper beschleunigen.

Dazu kommen noch Körper, die von Natur aus Kräfte besitzen (Erde, Magnet), sowie schwere Körper aufgrund ihrer "Eigenschaft" Gewicht.

Diesen aktiven Körpern stehen passive gegenüber: Gegenstände, die sich nicht bewegen und solche, die sich in entspannten, stabilen Lagen befinden. Teilweise wird mit der aktiv/passiv-Einteilung das Zweckdenken (Denkrahmen 7) in der Weise verbunden, daß "richtige", aktive Kräfte einem Ziel dienen (Verformung, Bewegung, Beschleunigung), während passive Widerstände nicht-absichtsvoll ausgeübte Hemmnisse darstellen. Ein Startblock kann auf den Sprinter keine Kraft ausüben, weil er lediglich stabil ist und als Widerstand verhindert, daß der Fuß wegrutscht. Gleiches gilt für die Straße in Bezug auf ein Auto oder einen Fußgänger. Der Fußgänger ist aktiv; er übt eine zielgerichtete Aktivität aus. Die Straße liegt nur passiv da. Ein Tisch übt auf ein auf ihm liegendes Buch keine Kraft aus. Er verhindert lediglich als Hemmnis, daß das Buch auf den Boden fällt.

Das Aktivitäts-Präkonzept wirkt sich darin aus, daß Reibungskräfte - soweit Reibungseinflüsse überhaupt als Kräfte konzeptualisiert werden - nur als Widerstände (Widerstandskräfte) akzeptiert werden. Es fällt Schülern schwer, Reibungskräften eine beschleunigende Wirkung zuzusprechen (z.B. bei Kurvenfahrten von Autos). Das Schlagwort "actio gleich reactio", das auch in der Form "Kraft gleich Gegenkraft" zur Bezeichnung des 3. Newtonschen Axioms verwendet wird, wird von Schülern durchgängig falsch verstanden. Die zweite Formulierung birgt noch

mehr Anlässe zu Mißverständnissen als die erste. "Actio" und "reactio" verleiten zu einer Einteilung in aktive Ursache und passive Wirkung, was implizit eine Wertung der Kräfte bedeutet. Im newtonschen Sinne sind beide Kräfte jedoch vollkommen gleichberechtigt. Sie bilden keine zeitliche Abfolge. Mag man beim Läufer-Startblock Beispiel die Bezeichnungen der Kraft des Läufers auf die Starteinrichtung als actio und der instantanen Kraft des Blocks auf den Läufer als reactio noch als sinnvolle Einteilung empfinden, so verliert diese Unterscheidung ihre Anschaulichkeit z.B. bei der Frage, ob die Kraft, die ein Buch auf einen Tisch ausübt nun actio ist oder nicht vielmehr reactio zur Kraft des Tisches auf das Buch, welche die Gravitationskraft ausgleicht. Immerhin wäre bei dieser Sichtweise von actio und reactio noch der wesentliche Punkt beachtet, daß die beiden Kräfte an verschiedenen Körpern angreifen.

Kraft und Gegenkraft werden zumeist als zwei Kräfte verstanden, die sich auf einen Körper beziehen. Die "Gegenkraft" wird von einem Körper als passiver Widerstand gegen eine von außen einwirkende Kraft mobilisiert. Dadurch gibt er der äußeren Beeinflussung nur bedingt nach. Ein ruhender Körper, an dem eine Kraft angreift, bewirkt durch "seine" Gegenkraft, daß er entweder, wenn die Gegenkraft groß genug ist, sich gar nicht in Bewegung versetzen läßt (Vermischung mit Haftreibungsphänomenen) oder daß er der äußeren Einwirkung nur allmählich nachgibt. Eine Beeinflussung des in Wechselwirkung stehenden Körpers wird aus drei Gründen oft nicht ins Auge gefaßt:

- Die Gegenkraft ist die Reaktion eines passiven Körpers.
- Sie hat nicht das "Ziel", den anderen Körper zu beeinflussen.
- Die Bewegungsrichtung, des in Gang gesetzten Körpers ist entgegengesetzt zu der Richtung, in der er die Kraft ausüben müßte.

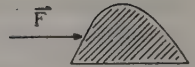
Die Gleichheit von Kraft und Gegenkraft wird in einem solchen Verständnis auf Gleichgewichtszustände bezogen, insbesondere auf den Ruhezustand. Für eine sichtbare Wirkung muß actio größer sein als reactio.

Feinstruktur und Diskussion des Elements an Beispielen

Fallstudien

Am ersten Unterrichtsprotokoll können verschiedene Auswirkungen des Präkonzepts 4 deutlich gemacht werden. Die Stunde fand in einem Leistungskurs statt. Thema ist die Einführung des Wechselwirkungsprinzips. Der Lehrer hat als Einstiegsbeispiel, an dem der Grundgedanke des dritten Axioms entwickelt werden soll, die Frage nach den Kräften bei der Fortbewegung gewählt.

Lehrer Wenn ich einen Startblock nehme - wo drücke ich mit dem Fuß gegen? (zeichnet Startblock)



Lorenz Gegen diese Schräge.

Lehrer Ja, das ist die Kraft, die ich ausübe, meine Körperkraft. (zeichnet Kraftpfeil) Und wie kommt jetzt die Kraft zum Beschleunigen zustande? - Wenn jetzt nur diese Kraft wirkt, was müßte da passieren?

Lorenz Der Startblock fliegt weg.

Lehrer Ja, wenn da nur eine Kraft wirkt, dann geht die Post ab. Aber weil das ein anständiger Startblock ist, bleibt der stehen. Also, was muß da noch wirken?

Arnim Eine Gegenkraft.

Lehrer Ja, und wie groß muß diese Kraft sein, die der Startblock jetzt wieder ausübt?

Bernd Gleich der Kraft, die jetzt auf den Startblock wirkt. Wenn die kleiner ist, dann würde der Startblock wegfiegen.

Der Lehrer legt durch seine Formulierungen den Gedanken nahe, daß der Startblock eine Kraft zur Eigenstabilisierung aufbringt. (Der Block fliegt natürlich deshalb nicht weg, weil er starr mit der Erdmasse verbunden ist. Der Läufer steht in Wechselwirkung mit Startblock plus Erde.) Das Stichwort "Gegenkraft" wird von Bernd als eine Kraft aufgegriffen, mit der der Startblock sich gegen eine Verschiebung "wehrt". Kraft und Gegenkraft beziehen sich auf den gleichen Körper. Sie müssen deshalb gleich groß sein, weil der Startblock in Ruhe bleibt. Wäre die Gegenkraft kleiner, dann würde die Starteinrichtung wegfiegen. Da die Gegenkraft quasi eine Eigenschaft des Körpers ist, könnte sie theoretisch aber auch größer sein und dann -

Lorenz Und wenn die größer ist, dann bleibt der aber trotzdem stehen. Das heißt noch lange nicht, daß der jetzt nach vorne - Ich habe noch keinen ausschlagenden Startblock gesehen.

Lehrer Ich auch nicht. Was muß dann mit den Kräften aber sein?

Ulf Die Kraft muß gleich groß sein. Wenn die Kraft jetzt größer wäre, würde der Startblock ein bißchen mit nach vorne rutschen.

Lorenz Nochmal zu dem Startblock: So, wie der da ist (deutet auf Tafelskizze), - bei dieser Kraft - da ist die gleich: Kraft gleich Gegenkraft. Jetzt übe ich eine größere Kraft aus - dann müßte doch der Startblock ein bißchen wegrutschen, wenn es der gleiche Startblock ist und ich die Kraft, die ich auf ihn ausübe, erhöhe.

Lorenz geht davon aus, der Startblock besitze eine Widerstandsfähigkeit, Gegenkraft genannt, mit der er äußeren Beeinflussungen widersteht. Ist die angreifende Kraft kleiner als die Widerstandsfähigkeit, bleibt der Körper in Ruhe, denn die Gegenkraft ist eine passive Kraft, sie wird nicht aktiv aus sich selbst oder gar andere Körper ausgeübt. Ist die äußere Kraft jedoch größer als die (maximale) Widerstandsfähigkeit, dann zeigt sich eine Wirkung - der Startblock rutscht weg.

Der Lehrer sieht, daß die Diskussion in eine Sackgasse geraten ist, weil sie sich um die stabile Lage des Startblocks dreht und nicht um die Wechselwirkung Startblock - Läufer, auf die er eigentlich hinauswollte. Er geht zu einem anderen Standardbeispiel über.

Lehrer Nehmen wir ein anderes Beispiel: Wenn ich einen Tisch habe und da ein Stück Kreide drauflege (demonstriert), was für Kräfte wirken da?

Arnim Die Gewichtskraft wirkt nach unten und der Tisch wird eine Gegenkraft aufbringen, um sie oben zu halten.

Lehrer Wie groß ist die Gegenkraft?

Arnim Gleich der Gewichtskraft.

Lehrer Ja. Was würde nämlich sonst passieren?

Arnim Da würde die Kreide irgendwie durchfallen.

Lehrer Oder - andersherum - die Kreide nach oben gehen. Und jetzt nehme ich einen Kassettenrecorder, der ist nun ein bißchen schwerer als die Kreide. - Was ist hier mit der Gegenkraft des Tisches?

Arnim Die ist auch so groß wie die Gewichtskraft des Kassettenrecorders.

Detlev Ich versteh nicht, warum der Tisch eine Kraft ausüben kann.

Das Tisch-Beispiel ist zur Einführung des Wechselwirkungsprinzips schlecht geeignet, da eine Verzahnung vorliegt zwischen Wechselwirkungskräften im Sinne des dritten Axioms und "Gegenkräften" im Sinne von "entgegengesetzt gerichteten" Kräften, mit denen zwei oder mehrere Körper auf einen dritten einwirken. Die Kraft des Tisches auf die Kreide ist in diesem Sinne Gegenkraft zur Gravitationskraft, die die Erde auf die Kreide ausübt. Gleichzeitig ist die Kraft der Kreide auf den Tisch (nachweisbar durch eine leichte Verformung des Tisches) Wechselwirkungskraft mit der Kraft des Tisches auf die Kreide. Während die Wechselwirkungskräfte immer entgegengesetzt gleich groß sind, gilt das für Kraft und Gegenkraft nur für den unbeschleunigten Zustand.

Dennoch kann man an den Schüleraussagen das Präkonzept 4 diskutieren. Während Arnim davon spricht, daß der Tisch eine Kraft ausübt (bei ihm fungiert P4 nicht), bereitet Detlev diese Vorstellung Probleme. Wiederholen wir Detlevs Aussage.

Detlev Ich versteh nicht, warum der Tisch eine Kraft ausüben kann.

Ludwig Das merkst du doch, sonst würde der zusammenkrachen.

Lehrer Was würde passieren, wenn der Tisch keine Kraft aufbringen könnte?

Detlev Die Kreide würde durchfallen.

Lehrer Ja, nicht wahr?

Detlev Ja, aber ich meine, das muß doch nicht unbedingt eine Kraft sein. Der Tisch ist aus Holz, und der ist eben stabil. Ich sehe da keine Kraft.

Lehrer Sieht da jemand eine Kraft?

Ludwig Ja, mal sehen. Der Tisch ist irgendwo so eine Masse und besteht ja auch aus Elementen, und die bewegen sich in einer gewissen Weise. Da muß ein gewisser Zusammenhalt sein in dem Klotz. Und die sind eben so stabil zusammen, daß, wenn man da irgendein Gewicht draufstellt, daß sie das nicht einsacken lassen.

Detlev Sehen Sie? Er hat auch das Wort Stabilität benutzt und keine Kraft.

Ludwig Ja, Stabilität ist ja irgendeine Kraft.

In Detlevs Aussagen spiegelt sich das Präkonzept 4 unmittelbar wieder. Der Tisch leistet aufgrund seiner Stabilität passiven Widerstand gegen das Durchfallen der Kreide - aber das ist nicht gleichbedeutend mit der Ausübung einer Kraft. Auch Lutz sieht weniger eine Kraft auf die Kreide, als Kräfte, die zwischen den mikroskopischen Teilchen des Tisches herrschen und dessen Stabilität sichern, so daß er Belastungen standhält.

Detlev war mit den in der Stunde gegebenen Erläuterungen zur Kraft des Tisches auf das Kreidestück nicht zufrieden. Er kam in der Pause zum Verfasser und äußerte nochmals sein Bedenken, daß ein Tisch keine Kraft ausüben könne. Die Aufstellung einer Kräftebilanz, nach der, neben der Gravitationskraft, noch eine zweite Kraft an der Kreide angreifen müsse, die nur vom Tisch ausgeübt werden könne, überzeugte ihn nicht. Die formale Argumentation konnte das Aktivitäts-Schema aus Präkonzept 4 nicht überwinden. Detlev gab sich erst zufrieden, als der Verfasser den Vorschlag machte, sich zwischen den Teilchen des Tisches kleine Federn vorzustellen, die bei einer Belastung gedehnt oder gestaucht würden, wodurch eine elastische Kraft auf die Kreide ausgeübt werde. Federn genügen dem Aktivitätsschema. Sie können im Spannungszustand aktiv Kräfte ausüben.

*

Besondere Schwierigkeiten bereitet Schülern die Vorstellung, daß ein passiver Körper, wie ein Tisch, in der Lage sein soll, auf zwei unterschiedlich schwere Gegenstände jeweils unterschiedliche Kräfte auszuüben. Eine "Kraft des Tisches" wird teilweise als "Stabilitätskraft" von bestimmtem Betrage angesehen, die ein starrer Körper immer besitzt. Wird dann im Unterricht von einer Kraftausübung des Tisches auf andere Körper gesprochen, kann es dazu kommen, daß dafür die fixe Kraft "des Tisches" herangezogen wird - mit natürlich absurden Folgen, die jedoch nicht dazu führen, die Vorstellung einer festen Kraft aufzugeben, sondern eher dazu, es für unsinnig zu erklären, dem Tisch überhaupt eine Fähigkeit zur Kraftausübung zuzusprechen.

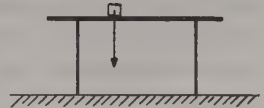
An der Vorstellung einer betragsmäßig festen Kraft des Tisches ist das Eigenschaftsdenken (Denkrahmen 5) beteiligt. Die Schüler binden die Größe der auftretenden Kräfte an die am Vorgang beteiligten Körper selbst (Gewicht der Kreide, Stabilitätskraft des Tisches), statt funktional aus dem Bewegungszustand der Kreide auf die resultierende Kraft zu schließen und daraus die Einzelkräfte zu ermitteln.

Zur Illustration dient der zweite Protokollauszug. Er stammt diesmal aus einem Grundkurs. Nils meldet sich, um eine Frage zur vorhergehenden Unterrichtsstunde zu stellen, in der über die Kräfte gesprochen worden war, die auf ein Schlüsselbund wirken, das auf einem Tisch liegt.

Nils Also, das Prinzip mit dem Tisch da, das versteh ich überhaupt noch nicht.

Lehrer Was nicht? Erzähl mal.

Nils (geht zur Tafel, zeichnet) Also, hier muß jetzt eine Gegenkraft wirken. Gut, das haben wir herausgefunden. Aber daß die Kraft des Tisches immer genauso groß sein muß wie die Kraft, die dagegenwirkt, das seh' ich nicht ganz ein, weil - also ich kann mir nicht vorstellen, daß das Schlüsselbund jetzt genausoviel Kraft hat wie z.B., wenn ich jetzt eine Tasche, oder so, auf den Tisch lege. Und die Kraft des Tisches, die bleibt ja immer gleich. Und wenn ich jetzt einmal eine Tasche drauflege, dann müßte die Kraft ja eigentlich größer sein. Und dann muß da ja irgendwas durchsacken, oder was weiß ich. Und das tut es ja nicht.



Lehrer Ja, irgendwann sackt es ja auch mal durch.

Nils Aber wir haben doch festgestellt - wenn jetzt die Kraft, die jetzt nach unten wirkt, kleiner ist, dann müßte es hochgehen. Das hat vorhin (1. Teil der Doppelstunde) jemand gesagt. Das ist ja aber nicht der Fall.

Lehrer Ist erstmal die Frage von Nils klar?

Schüler Ja.

Lehrer (erläutert das Problem am Beispiel unterschiedlicher Eindrungen eines Schwamms, auf den unterschiedliche Gewichtsstücke gelegt werden)

Nils Aber wenn ich jetzt eine Kraft habe, die ein bißchen kleiner ist als die Gegenkraft des Schwamms?

Lehrer Das geht nicht.

Nils Wieso geht das nicht?

Lehrer (erläutert die Frage an einem Regelkreis)

Nils Und wenn ich jetzt ein Blatt drauflege, wird der Schwamm dann auch eingedellt, oder was?

Lehrer Ja. Das würde man dann nur nicht mehr sehen können.

Nils' Problem ist, daß er von der "Kraft des Tisches/Schwamms" als einer Kör-

pereigenschaft ausgeht. Letztlich steckt hinter seinen Einwänden die Skepsis, ob der Tisch als passiver Körper überhaupt eine Kraft ausüben kann.

*

In einer Klausur (Grundkurs 11. Klasse) wurde die folgende Aufgabe gestellt:

Ein 100m-Läufer startet in gebückter Haltung von einem Startblock.

- a) Machen Sie eine Skizze, tragen Sie darin die wirkenden Kräfte mit Pfeilen ein und beschreiben Sie diese Kräfte!
- b) Welche Bedeutung haben Startblock und gebückte Haltung für das Gelingen des Starts?

Zum Kurs ist anzumerken, daß das Wechselwirkungsprinzip nicht behandelt worden war, wohl aber der richtungsmäßige Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung. Von den 30 Schülern des Kurses zeichneter nur 3 in der Skizze eine Kraft, die vom Startblock auf den Läufer ausgeübt wird. Neun weitere Schüler zeichneter Pfeile ohne bestimmten Angriffspunkt in Laufrichtung. In den anderen Fällen waren nur Pfeile gegen den Startblock enthalten. Als Beschreibungen der nach vorne gerichteten Pfeile wurden unter anderem gewählt:

"Der Block wirkt der Muskelkraft durch "Standkraft" entgegen, die es dem Läufer ermöglicht, sich mit seiner Kraft nach vorne zu beschleunigen."

"Energie, die der Läufer aufbringt."

"Der Startblock sorgt für Gegenkraft, damit der Läufer nicht wegrutscht."

Für die Kraft, die den Läufer beschleunigt, ist im Aktivitätsdenken der Läufer selbst zuständig. Der Startblock verhindert als fester Halt ein Wegrutschen. Das ist unter sportlichen Gesichtspunkten eine zutreffende Beschreibung.

Bei einigen Schülern waren aber auch Aussagen zu finden, an die man zur Explizierung des Wechselwirkungsprinzips anknüpfen könnte:

"Der Läufer drückt gegen den Startblock, und dieser gibt die Kraft zurück."

"Dadurch, daß der Läufer sich von den Startblocks abdrückt, bekommt er gewissermaßen eine Rückstoßkraft, die in vorwärts drückt."

"Der Läufer erzeugt eine Kraft, indem er die Füße gegen den Startblock preßt."

"F₁ ist die Kraft in die Richtung, in die der Läufer startet. Um aber loslaufen zu können (bzw. die Kraft F₁ entstehen zu lassen), muß es eine Gegenkraft geben. Dies ist F₂ (Pfeil vom Läufer zum Startblock) F₂ ist genauso groß wie F₁."

*

Kraft und Widerstand - Fallstudie

Das Aktivitätsdenken und seine spezifische Ausprägung im Präkonzept 4 verleitet Schüler dazu, eine qualitative Unterscheidung zwischen aktiven Bewegungskräften und passiven Bewegungswiderständen vorzunehmen. Schüler lehnen es nicht prinzipiell ab, Luft-, Gleit- oder Rollwiderstände als Kräfte zu bezeichnen. Sie sehen diese Kräfte aber nicht auf der gleichen Rangstufe wie Antriebskräfte. Als Kräfte werden primär die Einflüsse auf eine Bewegung konzeptualisiert, die deren Fortbestand sichern. Daß es sich bei den Widerständen ebenso um Kräfte handelt, die zusammen mit den Antriebskräften den Bewegungsverlauf bestimmen, wird weniger wahrgenommen. Das wirkt sich besonders bei der Aufstellung von Kräftebilanzen aus.

In unserer Fallstudie wird die Frage behandelt, wie die Erfahrung, daß ein Auto beim Gaswegnehmen langsamer wird, mit dem Satz $F = m \cdot a$ zusammenpaßt.

Lehrer Ihr müßt dauernd auf das Gaspedal treten - also wirkt eine Kraft. Aber da ist keine Beschleunigung. Wie kommt denn das? Wir haben doch gesagt, immer wenn eine Kraft wirkt, ist auch eine Beschleunigung da.

S 1 Man wird doch langsamer. Deswegen beschleunigt man immer.

Nils Nein. Man beschleunigt doch gerade nicht.

Lehrer Man fährt doch immer gleich.

S 2 Durch die Reibung, oder so, wird das Auto immer langsamer.

Lehrer - würde langsamer werden, wenn man kein Gas gäbe.

S 1 Ja. Und deshalb gibt man Gas, um wieder zu beschleunigen, um auf 120 zu kommen.

Lehrer Aber du fährst doch immer gleich.

David Wenn das Gaspedal so bleibt, wie es ist, dann bleibt das auch immer so.

Nils Ja, es wird immer eine gleichbleibende Kraft zugeführt.

Lehrer Deswegen müßte das Auto doch beschleunigen.

David Was?!

Lehrer Es gilt doch $F = m \cdot a$. Kraft ist da, Masse, dann müßte da doch eine Beschleunigung rauskommen. - Aber jeder weiß, wenn ich das Gas wegnehme, bremst das Ding. Woran liegt das?

Ein Auto verliert beim Gaswegnehmen an Tempo; das ist eine allgemeine Erfahrung. Die Ursache dafür sind die Reibungswiderstände. Es besteht für die Schüler jedoch kein zwingender Anlaß, den Vorgang unter dem Aspekt "(negative) Beschleunigung - also (Brems-) Kraft" zu sehen, denn es fehlen die Kriterien Aktivität und Zweck. Als Kraft tritt nur die Motorkraft ins Bewußtsein, denn sie dient dem Zweck der Fortbewegung und wird von einem "aktiven" Körper ausgeübt. Der vermeintliche Widerspruch zur Gleichung $F = m \cdot a$ stellt sich für

die Schüler nicht als Problem. Für sie hat der Satz nicht die überragende Stellung, die vorausgesetzt werden muß, um am behandelten Beispiel einen kognitiven Konflikt zu entzünden. Es ist einfach eine Tatsache, daß man, wie Nils es formuliert, "eine gleichbleibende Kraft zuführt", um das Tempo zu halten. Der Lehrer muß ständig auf den scheinbaren Widerspruch zwischen Theorie und Erfahrung hinweisen.

Lehrer Was für eine Kraft wirkt noch auf das Auto? - Außer der Kraft des Motors?

Uwe Die Masse. Z.B., wenn man bremst, dann geht das noch weiter nach vorne.

Lehrer Über das Bremsen müssen wir uns noch unterhalten. Aber warum verbrauche ich Benzin, wenn ich mit konstanter Geschwindigkeit nach Hamburg fahre?

Nils Weil immer die gleiche Menge Benzin zugeführt wird.

Lehrer Ja, warum denn? Da müßte doch nach unserer Gleichung eine Beschleunigung rauskommen. - - Das steht da doch: $F = m \cdot a$.

Rolf Die ganzen Reibungswiderstände müssen ja ausgeglichen werden.

Lehrer Ja. Der ganze Luftwiderstand usw. wirkt als Gegenkraft gegen das Auto. Und diese Kraft muß ich über den Motor wieder ausgleichen, damit ich mit konstanter Geschwindigkeit fahre. (erläutert anhand einer Tafelskizze die am Auto angreifenden Kräfte)

Rolf sagt, die Bewegungswiderstände müßten ausgeglichen werden. Es ist zu beachten, daß in der gesamten zitierten Passage nur der Lehrer von Reibungskräften spricht.

Lehrer Was ist mit dem Bewegungszustand von Körpern, wenn keine resultierenden Kräfte angreifen?

Conrad Dann bleibt der gleich.

Lehrer Dann bleibt der gleich. Das haben wir mit diesen Bahnen und den Kugeln gesehen. Wenn keine Kraft wirkt, dann rollen die ewig.

Thomas Gesehen haben wir das nicht.

Conrad (ironisch) Das war ein fiktionaler Versuch.

Lehrer (erläutert nochmal, daß das "F" im zweiten Newtonschen Axiom die Summe aller angreifenden Kräfte bezeichnet)
(...) Man muß immer die Summe aller Kräfte berücksichtigen.

David Also die Masse auch.

Lehrer Nein. Masse ist keine Kraft.

David Aber ein Widerstand.

Wenn die Masse keine (Gegen-) Kraft ist, wird sie von David zu den Widerständen gezählt. Unter "Widerstände" fallen für Schüler alle Faktoren, die eine Bewegung oder das In-Bewegung-Setzen behindern. Wir behandeln die Kopplung

von Masse, Gewicht und Reibung unter dem Präkonzept 5 (siehe Punkt B.3.3.2.5).

Die Konstanz der Geschwindigkeit bei Wegfall aller Kräfte war im Unterricht an Gedankenexperimenten erarbeitet worden. Der Einwand von Thomas "Gesehen haben wir das nicht" bringt eine gewisse Skepsis über die Gültigkeit der Feststellung zum Ausdruck, ebenso Conrads in ironischem Ton gehaltene Replik "Das war ein fiktionaler Versuch".

In der Fortsetzung des Wortprotokolls werden noch einmal zwei Auswirkungen des Präkonzepts 4 deutlich:

- die qualitative Unterscheidung zwischen Kraft und Widerstand
- die Vorstellung, Kräfte müßten Widerstände "überwinden", d.h. sie müßten stärker sein als die Widerstände.

Nils Gut, wenn die Widerstände genauso groß sind wie die Kraft, dann bewegt der sich mit konstanter Geschwindigkeit, dann ist keine Beschleunigung da. Aber damit man konstant 120 fahren kann, muß ja die Kraft des Autos größer sein als der Widerstand. Das heißt, für das F in der Gleichung setzen wir - was weiß ich - 120 ein, und dann ist da eine Beschleunigung, oder was? Dann würde ja eine Beschleunigung rauskommen.

Lehrer Einen Moment. Du hast da eine Annahme gemacht, nämlich, damit wir konstant 120 Kilometer in der Stunde fahren können, muß die Kraft nach vorne, die ich da gezeichnet habe, größer sein als die nach hinten.

Nils Ja, damit überhaupt etwas fahren kann.

Lehrer Ja, stimmt das so? - - - (lange Pause) Nein, das ist nicht so. Wir fahren ja schon 120 Kilometer in der Stunde. Den Vorgang des Beschleunigens haben wir abgeschlossen und fahren jetzt konstant 120.

Thomas Aber damit wir überhaupt 120 fahren, muß doch die Kraft größer sein, oder nicht?

Lehrer Nein.

Thomas Warum nicht?

Lehrer Um auf 120 zu kommen, müssen wir beschleunigen, ja. Aber wir fahren jetzt 120, und wir wollen jetzt diesen Bewegungszustand beibehalten. Dann brauchen wir keine Kraft. Also muß die Summe aller Kräfte Null sein.

Uwe Das versteh' ich nicht. Man hat eine Motorkraft, aber man braucht keine Kraft, um sich fortzubewegen?

Lehrer Man braucht die Motorkraft, um die ganzen anderen Widerstände auszugleichen.

Uwe Also ist doch eine Kraft da.

Lehrer Aber die Gesamtsumme aller Kräfte, Luftwiderstand, Reibung und Motorkraft - wenn ich die aufaddiere, dann ist es Null.

Nur der Lehrer bilanziert Antriebs- und dissipative Reibungskräfte zur resultierenden Kraft. Die Schüler unterscheiden zwischen Kräften und Widerständen. Sie sind auf die aktive Motorkraft fixiert (Uwe: "Also ist doch eine Kraft da"). Aus dieser Schwerpunktsetzung resultiert ein gewichtiger Teil der Probleme, die Schüler damit haben, den Trägheitssatz als Strukturierungshilfe für irdische Verhältnisse (Vorhandensein von Reibungskräften) anzuerkennen.

B.3.3.2.5 Präkonzept 5: Kopplung von Trägheit, Gewicht und Reibung

P5: Träge Masse, Gewicht/Erdbanziehungskraft und Reibungskräfte sind in einem Widerstands-Konzept verkoppelt, das alle Hemmnisse gegen die Beschleunigung/Bewegung von Körpern umfaßt.

Grobstruktur des Vorverständniselements

Grundsätzlich geht es um die Differenzierung zwischen schwerer und träger Masse. Die Kopplung von träger Masse mit Reibungskräften im Konzept des Bewegungswiderstands drückt sich in der Vorstellung aus, bei starker Verminderung von Roll- oder Gleitreibungskräften könne man auch Körper großer Masse mit einer beliebig kleinen Kraft stark beschleunigen. Die Kenntnis des Satzes $a = F/m$ wirkt sich nicht korrigierend aus, weil er von Schülern zwar formal angewendet werden kann, aber meist keinen Eingang in die qualitative Konzeptualisierung von Phänomenen findet. Schüler wissen aus ihrer alltäglichen Erfahrung, daß leichte Gegenstände einfacher in Bewegung zu setzen sind als schwere. Außerdem wird das In-Bewegung-Setzen bzw. Bewegen von Gegenständen einfacher, wenn man die Reibung herabsetzt, man "braucht" dann weniger Kraft. Einen isolierten Faktor "träge Masse" gibt es im Alltagsdenken nicht. Masse ist immer mit dem Gewicht (schwere Masse) verknüpft. Im Physikunterricht gibt es dagegen Geräte (Luftkissenfahrbahnen und -tische), die dazu dienen, Bewegungen zu simulieren, bei denen durch Ausgleich der Gewichtskraft die schwere Masse und die Reibungskräfte ausgeschaltet werden (bis auf innere Reibung im Luftkissen) und ein Beschleunigungsvorgang simuliert werden kann, bei dem eine einzelne, beschleunigende Kraft am Körper angreift. Der Betrag der Beschleunigung wird dann allein durch die träge Masse bestimmt.

Nicht alle Schüler vollziehen die Entkopplung von schwerer und träger Masse mit. Die Kompensation des Gewichts wird als Verminderung des Bewegungswiderstands insgesamt aufgefaßt. Es wird extrapoliert, daß bei vollkommener "Aufhebung" des Gewichts, wie es bei Luftkissenbahnen nahezu möglich ist, nur eine verschwindend kleine Kraft erforderlich sei, um schwere Gegenstände beliebig stark zu beschleunigen.

Die Anziehungskraft der Erde wird von manchen Schülern ebenfalls zu den Bewegungswiderständen gezählt. Nach dieser Vorstellung bewegen sich Körper im Anziehungsbereich der Erde wie in einem zähen, Kraft-/Energie-verzehrenden Medium. So wird für die allmähliche Abnahme der Steighöhe eines mehrmals auftrumpfenden Balles die Erdbanziehung mitverantwortlich gemacht.

Diskussion des Elements an Beispielen

Schwerelos = trägheitslos

Die Vorstellung, daß Körper bei Kompensation der Gewichtskraft bzw. vollkommener Ausschaltung der Reibung gleichzeitig ihre Trägheit verlieren, ist die wichtigste Erscheinungsform des Präkonzepts 5. Albert spricht die Vorstellung in einer Einführungsstunde zum Kraftbegriff direkt aus. Das Unterrichtsgespräch bezieht sich auf Beschleunigungsexperimente auf einer Luftkissenbahn.

Lehrer Wie ist der Zusammenhang zwischen Masse und Beschleunigung? Haben wir da irgendwelche Vermutungen dazu?

Albert Da ist ja ziemlich wenig Reibung durch die Luftkissenbahn. Daher müßte es ja ziemlich egal sein, wie schwer der Wagen ist, weil der ja fast so einen Zustand der Schwerelosigkeit auf horizontaler Achse hat.

Lehrer Ja, sicherlich. - (zögert) da ist sehr wenig oder fast keine Reibung. Aber bedeutet das, wenn etwas mit wenig Reibung sich bewegen läßt, daß wir den auch mit unheimlich wenig Kraftaufwand beliebig beschleunigen können?

Phillip Das wäre eine Frage des Gewichts. Aber hier spielt ja die Masse eine Rolle, und die ist unabhängig, egal, ob auf der Erde oder auf dem Mond.

Lehrer Albert, vielleicht mal so ein kleines Gedankenexperiment: Angenommen, wir könnten eine Luftkissenbahn bauen, auf die wir einen richtigen Eisenbahnwaggon stellen, und dann würden wir wieder so ein 10g Gewicht dranhängen mit einem Bindfaden und einer Rolle, würde der dann genau genauso reagieren?

Albert Ja, also - - (zögert) Auf dieses Beispiel - ja, ich meine, wenn keine Reibung da ist, dürfte es eigentlich - na ja, aber - meinetwegen, dann also nicht.

Da der Wagen auf der Luftkissenbahn sich "fast in einem Zustand der Schwerelosigkeit" befindet und deshalb auch keine Reibung zwischen Fahrbahn und Wagen auftritt, meint Albert - im Gegensatz zu Phillip - damit spiele die Masse keine Rolle mehr. Er lenkt nach dem vom Lehrer sehr suggestiv formulierten Beispiel (vgl. Aufgabe B3 des Tests DAM; B.2.2.2) ein, läßt aber erkennen, daß er "eigentlich" meint, wenn die Reibung auch beim Eisenbahnwaggon vollkommen aufgehoben wäre, könnte man ihn mit dem 10g Gewicht ebenso stark beschleunigen wie einen kleinen Experimentierwagen.

Sven Da wirkt ja noch die Anziehungskraft der Erde. Der Wagen wird ja nach unten gezogen. D.h. diese Kraft ist ja viel größer als dieses Ding - als diese 10 Gramm. Da stehen sich zwei Kräfte gegenüber: Einmal die Kraft, die den Wagen - also die Anziehungskraft der Erde - und dann dieses Gewicht.

Lehrer Ja, aber in welcher Richtung wirkt denn die Kraft, die von diesem nach unten sinkenden Gewicht auf den Wagen ausgeübt wird?

Sven Waagerecht.

Lehrer Ja. Und die Gewichtskraft wird quasi ausgeglichen durch die Luftkissenfahrbahn; die trägt das Ding ja.

Sven Ist doch egal. Die Anziehungskraft wirkt trotzdem noch.

Kai Ja, aber da ist doch keine Reibung.

Lehrer Na ja, gut. Also langer Rede kurzer Sinn ... (referiert die Hypothese a prop. $1/m$)

Sven begründet die Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse über die Anziehungskraft der Erde. Die Erde versucht den Körper festzuhalten und nach unten zu ziehen - so als befände er sich in unsichtbaren Fangarmen, die von der kleinen Beschleunigungskraft nur langsam gedehnt werden können (Erdanziehung als Bewegungswiderstand).

Kais kurze Bemerkung am Schluß deutet darauf hin, daß er ähnlich denkt wie Sven. Da der Lehrer die Diskussion an dieser Stelle abbricht, wird Kais Vorstellung nicht deutlich. Kai führt seine Sichtweise an anderer Stelle aus. Man erkennt dort, daß auch er meint, bei vollkommener Reibungsfreiheit spiele die Masse für die Beschleunigung eines Körpers keine Rolle (siehe Fallstudie 3; Seite 533f).

*

Ein zweites Unterrichtsbeispiel zur Kopplung von Trägheit, Gewicht und Reibung aus einem anderen Kurs:

Lehrer Um eine Masse in Bewegung zu setzen, brauche ich eine Kraft, das haben wir festgestellt. Nun aber im Weltraum: Da wirkt auf die Masse, keine Gewichtskraft. Da ist keine anziehende Masse vorhanden. Die Erde ist weit weg.

Uwe Also ist das egal, ob man eine Tonne hat oder ein Kilogramm, oder was?

Lehrer Ja, ist das so? Muß ich - egal, welche Masse der Körper hat - immer die gleiche Kraft aufwenden, um die gleiche Beschleunigung zu haben im Weltraum?

Bernd Ja, müßte eigentlich möglich sein.

Lutz Da fällt ja auch der Luftwiderstand weg.

*

Der Test DAM der zweiten schriftlichen Erhebung enthielt zwei Aufgaben zur Trägheit-Reibung-Kopplung.

Denkaufgabe B3

Stellen Sie sich den folgenden Gedankenversuch vor:
Ein vollbeladener Eisenbahnwaggon (Gewicht ca. 10t) wird auf eine riesige Luftkissenfahrbahn gestellt. Die Reibung wird dadurch praktisch aufgehoben. Die folgenden Aussagen sind auf diesen Gedankenversuch bezogen. Bewerten Sie sie als richtig oder als falsch:

- Durch die Versuchsanordnung wird die Trägheit des Waggons vermindert.
- Man könnte den Waggon auf eine Geschwindigkeit von 10km/h bringen, indem man ihn kurz mit dem kleinen Finger anschubst.
- Durch die Versuchsanordnung wird der Widerstand des Waggons gegen eine Beschleunigung herabgesetzt.

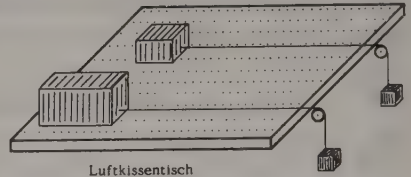
Wie die nebenstehende Tabelle zeigt (Unterschiede zwischen Leistungs- und Grundkursen fallen kaum ins Gewicht), stimmen 28% der Schüler bei Aufgabe B3 der Aussage zu, durch die Versuchsanordnung werde die Trägheit des Waggons vermindert. Zusammen mit dem Ergebnis, daß 29% es für möglich halten, man könne den Waggon durch kurzes Anschubsen auf ein Tempo von 10km/h bringen, ergibt das ein starkes Indiz für die Disposition zur Ver-

kopplung von Gewicht, Reibung und Trägheit zu einem Konzept "Bewegungswiderstand". Knapp 70% bezeichnen Aussage b) als falsch. Die Ablehnung erfolgte vermutlich ebenso intuitiv wie die Zustimmung. Überschlagrechnungen, z.B. anhand des Satzes $\Delta p = F \cdot \Delta t$, waren jedenfalls auf keinem der Lösungsblätter zu finden. Die Verneinung kann zu einem Teil auch erfolgt sein, weil Schüler sich eine vollkommene Reibungsfreiheit bei einem Körper von 10 Tonnen nicht vorstellen können (Fungieren von Denkrahen 1 "Realisationsdenken").

Sehr interessant ist die Kreuztabellierung der Teile a) und b). Die tatsächlichen relativen Häufigkeiten der Antwortkombinationen stimmen fast genau mit den aus den Randverteilungen vorhergesagten relativen Häufigkeiten überein (siehe die Tabelle auf der folgenden Seite). Es ist demnach nicht so, daß die Schüler, die meinen, man könne den Waggon mit dem kleinen Finger anschubsen, mit den Schülern identisch sind, die Teil a) zustimmen (und umgekehrt). Mögliche Interpretationen:

Denkaufgabe B6

Auf einem Luftkissentisch liegen nebeneinander ein kleiner und ein großer Holzklötz. Über Umlenkrollen sind an ihnen zwei gleich schwere Gewichte befestigt:



Zunächst wird das Gebläse des Luftkissentischs nicht eingeschaltet. Der große Holzklötz wird langsamer beschleunigt als der kleine. In einem zweiten Versuch wird das Gebläse des Luftkissentischs eingeschaltet.

Was geschieht jetzt?

Aufgabenteil	"richtig"	"falsch"
a) Die Trägheit des Waggons wird vermindert	28%	72%
b) Waggon kann mit kleinem Finger angeschubst werden	29%	71%
c) Widerstand des Waggons gegen Beschleunigung herabgesetzt	89%	11%

N = 246

- Zum Begriff Trägheit bestehen keine bestimmten Vorstellungen. Die träge Masse wird in keinen systematischen Zusammenhang mit Kraft und Beschleunigung gesetzt.
- Die Bedeutung der trägen Masse für die Beschleunigung wird im Vergleich zu den Reibungseinflüssen, denen die Bewegung unterliegt, als vernachlässigbar eingeschätzt. Dann kann der Waggon allein durch Aufhebung der Reibung spielend leicht beschleunigt werden - auch wenn die massebezogene Trägheit fortbesteht.

		b) Waggon mit kleinem Finger anzuschubsen	
		"richtig"	"falsch"
a) Trägheit vermind.	"richtig"	21 8,5%	49 20,2%
	"falsch"	50 20,3%	126 51,2%
		71 28,9%	175 71,1%
		246	

*

Antworttyp

1) Beide Klötze werden gleich beschleunigt	44%
2) Der kleine Klotz wird stärker beschleunigt	51%
3) Der große Klotz wird stärker beschleunigt	2%
4) Andere Antworten	2%

N = 249

Die Antworten zu Aufgabe B6 konzentrieren sich auf Typ 1 "gleiche Beschleunigung" und Typ 2 "Der kleine Klotz beschleunigt schneller/wird schneller beschleunigt". Der Anteil richtiger Antworten überwiegt nur geringfügig. Manche Antworten wurden ausführlich begründet. Darin

liegt ein Vorteil offener Beantwortungen gegenüber dem Multiple choice Verfahren. Für Antworttyp 2 wurden z.B. folgende Begründungen gegeben:

"Beide Holzklötze werden gleich beschleunigt, denn die Reibung ist aufgehoben. Die Masse der Holzklötze spielt nun keine Rolle mehr. Die Beschleunigung ist nur noch von der Gewichtskraft der Gewichte an den Umlenkrollen abhängig, die die gleiche Masse haben."

"Sie beschleunigen gleich schnell. Begründung: siehe Aufgabe 3a." (Dort heißt es: 'Durch die Versuchsanordnung (Luftkissenbahn) wird die Trägheit des Waggons vermindert'.)

In der ersten Antwort ist das Präkonzept 5 eindeutig wiederzuerkennen. Die zweite Begründung legt es nahe, die Antworten zu den Aufgaben B6 und B3b kreuzzutabellieren. Die folgende Tabelle zeigt einen Ausschnitt aus der Kreuztabelle. Es sind nur die Schüler berücksichtigt, die beide Aufgaben bearbeitet haben. Der Anteil konsequent richtiger Antworten beträgt 43%. Dem stehen 19%

zweifach falsche Antworten gegenüber. Die Zahlen liegen höher als nach den Randverteilungen zu erwarten. Das PRE-Maß (proportional reduction in error measures; vgl. Benninghaus 1982, 125ff) für die nominalskalierten Daten ergibt bei B6 als abhängiger Größe den Wert $\lambda = 0,17$ (17% Verbesserung der Vorhersage bei Kenntnis der Antwort auf B3b). Im umgekehrten Fall, also bei B3b als abhängiger Größe, ist

λ kleiner als 0,00. Daraus folgt eine gewisse Tendenz von Schülern, die B3b zustimmen, bei B6 gleiche Beschleunigungen anzunehmen. Eine strenge Korrelation der Art, daß nahezu alle Schüler, die bei B3b "richtig" angekreuzt haben, bei B6 beiden Klötzen die gleiche Beschleunigung zusprechen, besteht jedoch nicht.

Eine Ursache für das inkonsistente Antwortverhalten kann darin liegen, daß die beiden Items von den Schülern nicht als unterschiedliche Darstellungen des gleichen Problems aufgefaßt und daher voneinander unabhängig bearbeitet wurden. Ein übergeordneter Gesichtspunkt für die Erklärung lautet, daß jedes Präkonzept in einem individuellen Vorverständnis als Disposition zu einem entsprechenden Verhalten vorliegt. Das Verhalten ist durch das Vorhandensein eines bestimmten Vorverständniselements nicht determiniert. In dieser probabilistischen Auffassung kann man nicht erwarten, daß ein Schüler in ähnlichen Problemsituationen immer nach einem bestimmten Muster handelt - selbst dann nicht, wenn er die Situationen tatsächlich als strukturgleich erkennt. Es besteht für jedes Vorverständniselement lediglich eine gewisse Aktivierungswahrscheinlichkeit.

*

Erddanziehung als energieverzehrender Widerstand

In zwei SVUs befaßten sich Schülergruppen mit dem Phänomen der Abnahme der Steighöhe eines Körpers nach mehrmaliger elastischer Reflexion. In einem Fall wurden die Sprunghöhen eines Tischtennisballs gemessen, der auf eine Holz- oder Stahlplatte fiel. Im anderen Fall wurde das Problem auf eine Anordnung übertragen, bei der ein Gleiter auf einer geneigten Luftkissenfahrbahn am unteren Ende von einer Feder reflektiert wurde. Beide Gruppen argumentierten, daß

		B6) Luftkissentisch beide Klotze gleich beschl.		
B3b) Waggon mit Finger anzu- schubs.	"richtig"	13,7%	15,4%	
		44	24	68
	18,8%	10,3%	29,1%	
	"falsch"	32,9%	37,1%	
		64	100	164
		27,4%	42,7%	70,1%
	110	124	234	
47,0%	53,0%			

neben den Energieverlusten durch die nicht vollkommen elastischen Verformungen der Feder bzw. des Tischtennisballes auch die Erdanziehung für die Abnahme der Steighöhe verantwortlich sei. Die Schwerkraft wirke gegen den Körper, sie zöge ihn herunter. Damit war nicht gemeint, daß sich beim Aufsteigen die kinetische Energie in potentielle Energie umwandelt, sondern daß ein Teil der kinetischen Energie im Gravitationsfeld unwiederbringbar verzehrt wird: Die Erdanziehung wirkt als energieverzehrender Bewegungswiderstand.

B.3.4 Vorverständniskomponente III: Erfahrungen und Kenntnisse (E/K)

Die Zahl der Erfahrungen und Kenntnisse, die Schüler in den Mechanikunterricht einbringen oder in seinem Verlauf bilden, ist weitaus größer als die kleine Auswahl, die in der Komponente III des thematischen Vorverständnisses aufgelistet wird. Wir haben darauf verzichtet, typische Formelkenntnisse wie " $v = s/t$ ", " $v = a \cdot t$ " oder " $F = m \cdot a$ " usw. anzuführen. Lehrern sind die Kenntnisse, über die die Schüler aus dem jeweils erfahrenen Unterricht verfügen bzw. verfügen müßten, weitaus bekannter als die von den Schülern verfolgten Denkrahen, Interessen oder Präkonzepte. Es wäre daher müßig, sie in ähnlicher Breite zu diskutieren.

Über Erfahrungen, die beim Themengebiet Mechanik zum gewichtigeren Teil außerhalb des Unterrichts gemacht werden, sagt unsere Datenbasis wenig aus. Wir müssen auf allgemeine Alltagserfahrungen mit Bewegungen schwerer Dinge zurückgreifen. Es wurden zwei Erfahrungen ausgewählt, die mit wichtigen Präkonzepten zum Kraftbegriff korrespondieren. Das Vorverständniselement E2 "Kurvenfahrten" wird im Zusammenhang mit einem weitverbreiteten Präkonzept zu Kreisbewegungen (P6: "Bei Kreisbewegungen wirkt eine Kraft nach außen") behandelt, das systematisch eigentlich zur Vorverständniskomponente II gehört.

Die Tatsache, daß nur drei Elemente aus der Komponente III des thematischen Vorverständnisses dargestellt werden, soll die Bedeutung, die Erfahrungen und Kenntnisse für den Erkenntnis-/Lernprozeß - Wahl von Erkenntniszielen, Vollzug der Erkenntnishandlungen, Fixierung von Erkenntnisprodukten - neben Denkrahen, Präkonzepten und Interessen haben, in keiner Weise schmälern.

B.3.4.1

Erfahrung 1: Bewegungswiderstände

E1: Bewegungen unterliegen unter dem Einfluß von Widerständen.

Struktur und Bedeutung des Vorverständniselements

Es gehört zu den prägenden Alltagserfahrungen, daß Bewegungen hemmenden Einflüssen unterliegen. Besonders spürbar sind Luftwiderstände, die man z.B. beim Radfahren direkt erfährt. Dazu kommen Rollwiderstände und zahlreiche andere Reibungsverluste, denen man bei Bewegungen ausgesetzt ist, z.B. auch beim Gehen auf weichem oder körnigem Untergrund. Das Aufrechterhalten einer Bewegung erfordert ständige Anstrengung, die als persönlicher Kraft- oder Energieaufwand gedeutet wird (der von Maschinen/Motoren übernommen werden kann). Die Hemmnisse sind dagegen "naturgegeben". Mit ihnen ist kein Zweck verbunden. Es besteht wenig Anlaß, sie mit dem Wirken von Kräften in Zusammenhang zu bringen - zumal das im Widerspruch zum Aktivitätsdenken stehen würde (vgl. Präkonzept 6; B.3.2.2.2).

Selbst wenn der Luftwiderstand als Luftwiderstandskraft erkannt wird, steht die Erfahrung der eigenen Körperanstrengung im Vordergrund. Diese wird absichtsvoll zur "Überwindung" der Widerstände eingesetzt. Darauf geht das Präkonzept 3-2 zurück: "In Richtung der Bewegung wirkt eine Kraft". Nur wenn man sich aus der Position des "sich Bewegenden" herausbegibt und gedanklich die eines unbeteiligten Außenstehenden einnimmt, wird es möglich, alle Einflüsse auf den "in Bewegung befindlichen" Körper gleichberechtigt zu bilanzieren. Dieser Standortwechsel scheint jedoch weniger angelegt zu sein als der gegenläufige, bei dem sich der außenstehende Beobachter intuitiv in den bewegten Körper hineinversetzt und die Erfahrung der eigenen Kraftanstrengung auf ihn projiziert.

Der Vollzug des Standortwechsels ist ein wichtiger Schritt auf dem Wege zur Newtonschen Mechanik, weil mit ihm die Fixierung auf die aktiven, bewegungserzeugenden oder -erhaltenden Kräfte entfällt und die resultierende Kraft in Relation zum Bewegungsverlauf gesetzt werden kann.

Die Erfahrung mit Bewegungswiderständen führt dazu, daß Schüler Wert auf die Berücksichtigung von Reibungseinflüssen legen - selbst in Fällen, wo diese de facto keine Rolle spielen. Das ist eine Facette des Denkrahmens 1 "Realisationsdenken" (siehe B.3.2.1.1). Von 30 Schülern, die in einer Klausur nach den physikalischen Gründen für die gebückte Starthaltung von Sprintern gefragt wurden, schrieben 15 sinngemäß, durch die Haltung werde der Luftwiderstand verringert. In angefertigte Skizzen wurden vielfach Pfeile eingezeichnet, die den "Luftwiderstand" oder "Gegenwind" symbolisieren sollten, der auf den Läufer wirke.

B.3.4.2

Erfahrung 2: Kurvenfahrten

Präkonzept 6: Bei Kreisbewegungen wirkt eine Kraft nach außen

- E2: Durchfährt man in einem Fahrzeug eine Kurve oder sitzt man in Karussells, so muß man sich festhalten, um nicht nach außen getragen zu werden.
- P6: Ein Körper, der sich auf einer Kreisbahn bewegt, erfährt eine Kraft, die ihn nach außen, d.h. vom Drehpunkt weg zu ziehen versucht.

Struktur und Bedeutung der Vorverständniselemente

Bei schnellen Kurvenfahrten in Fahrzeugen (Auto, Bus, Straßenbahn) macht man die Erfahrung, daß man sich festhalten muß, um die Bewegung des Fahrzeugs mitzuvollziehen und seine relative Ruhelage zum Fahrzeug beizubehalten. Karussells auf Jahrmärkten sind dafür konstruiert, durch extreme Zentripetalbeschleunigungen die Empfindung eines Zug- oder Druckgefühls zu erzeugen, das mit einem gewissen Nervenkitzel verbunden ist. Die beim Mitvollzug von Drehbewegungen gemachten Erfahrungen sind so einprägsam, daß man sich bei einer Beobachtung von einem außerhalb, in einem Inertialsystem gelegenen Standpunkt aus intuitiv in das beschleunigte System hineinversetzt und die Bewegung in Gedanken von dort her "nachempfindet". Das "natürliche" Bezugssystem bei Kreisbewegungen ist das beschleunigte, nicht das Inertialsystem.

Das Gefühl, nach außen gezogen oder gedrückt zu werden, wird als das Wirken einer nach außen gerichteten Kraft gedeutet. Die Erfahrung, tatsächlich (vom beschleunigten System aus gesehen) vom Drehpunkt weg getragen zu werden, wenn der Kontakt zum beschleunigten System verlorenght oder zu schwach ist, entspricht dem Präkonzept 3-3, nach dem die Richtungen von Kraft und Bewegung übereinstimmen. Der Mitvollzug einer Kreisbewegung wird als Gleichgewichtszustand interpretiert: Kraft nach außen ("Zentrifugalkraft") und Haltekraft gleichen sich aus. (Siehe dazu Viennot (1979) unter Punkt C.2.2.)

Die geschilderten Erfahrungen und die damit verbundenen Deutungen sind bei der Behandlung von Kreisbewegungen im Rahmen der Newtonschen Dynamik so virulent, daß die Annahme einer nach außen wirkenden Kraft auf Seiten der Schüler alle Differenzierungen zwischen unterschiedlichen Bezugssystemen und auch eindringliche Hinweise auf die ersten beiden Newtonschen Axiome überdeckt. Das Wirken einer Zentrifugal- oder Fliehkraft wird als Quasitatsache vorausgesetzt. Es fungiert das Präkonzept 6, das so gefestigt ist, daß Schüler sich kaum bereit zeigen, seinen Gehalt auch nur zu überdenken. Lehrer-Argu-

mentationen im Inertialsystem auf der Grundlage der im Unterricht vorher behandelten elementaren Prinzipien der Mechanik (z.B. Kraft als Wechselwirkung zweier identifizierbarer Körper, Richtungsgleichheit von Kraft und Beschleunigung) laufen ins Leere, weil diese notwendigerweise formalen Argumente gegen die dominante Erfahrung 2 nicht ankommen. Nach einem rund 60-minütigen, intensiven Gespräch des Verfassers mit einer kleinen Schülergruppe über den genannten Problemkreis nach dessen Behandlung im Unterricht antwortete ein Schüler auf die Frage, ob sich seine Sichtweise von Kreisbewegungen nun geändert habe: "Ja. Ich sehe jetzt ein, daß es diese Zentripetalkraft nach innen gibt. Und daß die Kraft nach außen da ist, das war ja sowieso klar."

Die Problematik der unterrichtlichen Behandlung von Kreisbewegungen läßt sich nicht einfach dadurch beseitigen, daß man sie nur vom beschleunigten System aus betrachtet. Abgesehen von der Frage, warum vorher ausführlich die Newtonsche Theorie behandelt wird, wenn man sie auf komplexere Phänomene nicht mehr anwendet, spricht die Feststellung dagegen, daß Schüler Beobachtungsstandpunkte vermischen. Einerseits wird die gleichmäßige Kreisbewegung als Bewegung des Körpers bezüglich des Laborsystems verstanden - was sich z.B. in der Annahme einer "Tangentialkraft" in Richtung der jeweiligen Geschwindigkeit ausdrückt (vgl. Präkonzept 3-2) - andererseits wird die Bewegung als Gleichgewichtszustand zwischen einer Kraft nach außen, die nur im beschleunigten System angenommen werden kann, und einer Haltekraft nach innen interpretiert.

Diskussion an Beispielen

Wir diskutieren die Erfahrung 2, bzw. das aus ihr resultierende Präkonzept 6 zunächst an einem Unterrichtsprotokoll aus einem Leistungskurs, in dem zum wiederholten Male die Frage der bei einer Kreisbewegung wirkenden Kräfte behandelt wurde. Bevor in dem Kurs quantitative Versuche über die Abhängigkeit der Zentripetalkraft von Masse, Radius und Drehzahl angestellt wurden, war ausführlich über die qualitativen Merkmale von Beschreibungen im beschleunigten und im Inertialsystem gesprochen worden (Zeitraum etwa drei Schulstunden). Die Schüler hatten ihre Ideen, bei denen natürlich die nach außen wirkende Kraft eine zentrale Rolle spielte, geäußert untereinander sowie mit dem Lehrer eingehend besprochen. Diese Phase, die von anschaulichen Experimenten auf einer großen rotierenden Holzscheibe begleitet war, lag bedingt durch die Weihnachtsferien circa 3 Wochen zurück, als bei der Besprechung eines quantitativen Zentralkraftversuchs erneut alle vorher bereits einmal durchgesprochenen Probleme auftraten:

Lehrer Was passiert nun bei dieser Bewegung - bei dem Versuch, den ihr gemacht habt? - - (zeichnet) Warum bleibt der Körper auf der Kreisbahn?

Ulf Durch das Band.

Lehrer Kannst du das mal näher -

Ulf Auf den Körper wirkt eine Kraft nach außen weg. Und die wird kompensiert dadurch, daß das Band ihn zurückhält.

Lehrer Ist das so richtig?

Bernd Nein. Noch eine Kraft nach rechts.

Rainer Fliehkraft. Meiner Meinung nach wirkt eine Kraft nach oben und nach rechts.

Lehrer (zeichnet die Pfeile 1, 2 und 3 ein) Was bewirken diese drei Kräfte denn?

Lorenz Daß das Ding sich dreht.

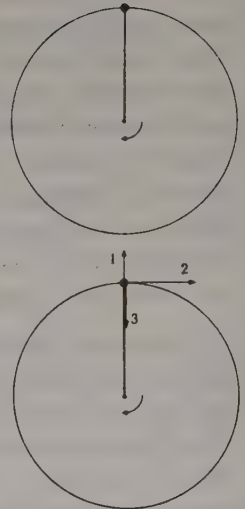
Markus Daß der Körper auf der Kreisbahn bleibt.

Jörg Die Kraft am Mittelpunkt ist die Gegenkraft gegen die beiden anderen.

Claus Da ist nur die Kraft, die nach unten zieht ... (beschreibt die Bewegung physikalisch korrekt im Inertialsystem)

Lehrer Ist das richtig so?

Rainer Da sind zwei Kräfte: die vom Band, die den Körper hält - die Zentripetalkraft - und die nach außen - die Zentrifugalkraft.



In den ersten, spontanen Einfällen (die für die Ermittlung von Vorverständniselementen besonders aufschlußreich sind) von Ulf, Rainer und Jörg ist, bei Zustimmung von Lorenz und Markus, wieder die Rede von einer "Kraft nach außen weg". Sie wird nach Ansicht von Ulf und Rainer durch das Band kompensiert, das den Körper festhält. Jörg und Rainer nehmen zusätzlich noch eine Kraft in Bewegungsrichtung an (vgl. Präkonzept 3-2). Claus beschreibt als einziger die Bewegung so, wie es in den vorhergehenden Unterrichtsstunden erarbeitet worden war. Claus hatte sich bereits damals gegen eine "Kraft nach außen" gewendet und sie für "unnötig" erklärt. Seine Sichtweise des Phänomens war von Anfang an newtonsch. Bei den meisten Schülern hat der Unterricht über Kreisbewegungen trotz intensiver Erörterung keine wesentlichen Umstrukturierungen erreicht. Das zeugt von der Resistenz des Präkonzepts 6 gegen Veränderungen und ist deutbar durch ein Übergewicht der Erfahrung 2 "Kurvenfahrten" gegenüber formalen Argumentationen auf der Grundlage der Newtonschen Axiome.

Im Fortgang der Stunde erinnerte sich Ludwig daran, daß die Kraft nach außen vom Lehrer als "Scheinkraft" bezeichnet worden war. Daß Ludwig die Vorstellung des Wirkens einer den Körper nach außen ziehenden Kraft letztlich aber nicht

aufgegeben hat, zeigt sich in seiner Begründung dafür, warum es die Zentrifugalkraft nicht geben soll:

- Lehrer Jetzt haben wir mindestens 4 verschiedene Vorschläge oder Kombinationen. Welche Kräfte gibt es denn nun?
- Ludwig Die nach innen und die nach rechts. Die Zentrifugalkraft gibt es ja nicht. Das ist nur eine Scheinkraft. Die ergibt sich nur dadurch, weil das ja immer nach rechts außen (Hervorhebung d.Verf.) gezogen wird. (Ludwig bezieht sich auf die Zeichnung 2.) Dadurch meint man, es würde nach oben gehen.
- Lehrer Also die Kraft nach innen will jeder haben. Wie ist es mit der Kraft nach rechts?
- Lorenz Die Kugel würde ja nach rechts wegfliegen, wenn ich den Faden durchschneide. Also wirkt da eine Kraft. Wenn die Kugel auf der Kreisbahn ist, dann ändert die Radiuskraft die Richtung, und wenn die nicht mehr da ist, fliegt die tangential weg.
- Lehrer Was passiert, wenn die Radiuskraft wegfällt?
- Ulf Dann fliegt die geradeaus weg. Das ist eigentlich keine Kraft, sondern nur die Richtung von v .
- Albert Das ist die Trägheit.
- Lehrer Das ist nur ein Wort. Erkläre das mal.
- Albert Die Kreisbewegung setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Da kann doch nicht nur eine Kraft wirken, um die auf der Kreisbahn zu halten. Die eine ist die nach innen. Die andere Kraft ist die, die die Kugel in der Lage halten will, in der sie ist. Die will die gerade Richtung beibehalten.
- Lehrer Ist das nun eine Kraft oder nicht?
- Thomas Das ist die Energie.
- Ludwig Eine Geschwindigkeit.
- Bernd Ihr habt mich überzeugt - also keine Kraft.

Die Kraft 2 in tangentialer Richtung (entsprechend P3-2 "In Richtung der Bewegung wirkt eine Kraft") wird von den Schülern nach entsprechendem Nachhaken des Lehrers durch Trägheit/Energie/Geschwindigkeit ersetzt - was aber nicht viel heißen muß, denn wie wir bei Präkonzept 3 gesehen haben, werden Kraft, Energie, Trägheit und Geschwindigkeit von Schülern als ähnliche Dinge gesehen und sogar vektoriell addiert (z.B. bei Aufgabe B1 des Tests DAM). Wie steht es mit der Kraft nach außen:

- S Was ist mit Pfeil 1?
- Lehrer Ja gut, was ist mit dem Pfeil nach außen?
- Thomas Das ist die Kraft, die die Kugel auf der Bahn hält.
- Claus Da gibt es gar keine Kraft.
- Lehrer Was ist denn das für eine Kraft?
- Thomas Das wissen wir noch nicht. Ich meine, Kraft 1 die merkt man, wenn

man am Radius zieht.

Lehrer Wie kommt man darauf F_1 einzuzeichnen?

Lorenz Weil man die nach innen hat - die ist ja auch da.

Thomas und Lorenz sehen F_1 und F_3 im Zusammenspiel dafür verantwortlich, daß der Körper auf der Kreisbahn bleibt. Die Kreisbahn hat den Charakter Gleichgewichtslage - der Abstand vom Drehpunkt bleibt konstant (vgl. Viennot 1979). Da die Existenz der nach innen gerichteten Kraft allgemein anerkannt wird, muß es zu ihrem Ausgleich eine Kraft nach außen geben, sonst würde der Stein sich gemäß P3-3 der wirkenden Kraft folgend auf den Drehpunkt zubewegen. Thomas hat vollkommen recht, wenn er sagt, daß man eine Kraft spürt, "wenn man am Radius zieht", d.h. am Führungsband zieht. Man spürt dann die Reaktionskraft des im Kreis herumgeführten Körpers zur Zentripetalkraft. Von den Schülern wird diese Kraft, die auf den Drehpunkt wirkt, als Zentrifugalkraft in den Körper selbst verlagert. Hier spielt die Erfahrung 2, bei Kurvenfahrten scheinbar nach außen gezogen zu werden, mit einer Erfahrung zusammen, die man z.B. beim Schleuderballwurf macht. Die Entkopplung der Kräfte, die auf den Körper und auf den Drehpunkt wirken, fällt deshalb schwer, weil Schüler die Aussage des dritten Newtonschen Axioms in aller Regel falsch interpretieren (siehe dazu Präkonzept 4; speziell das dadurch bedingte Verständnis von "actio gleich reactio").

*

Im Unterricht über Kreisbewegungen werden große Anstrengungen unternommen, den Schülern die Annahme einer universell, d.h. unabhängig vom Bezugssystem wirkenden Fliehkraft auszureden. Daß dem nur mäßiger Erfolg beschieden ist, zeigen die Ergebnisse einer Klausur, die in einem der empirisch begleiteten Leistungskurse geschrieben wurde. Die erste Aufgabe lautete:

"Gib eine Darstellung der Kräfte, die bei der Kreisbewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit auftreten. Fertige eine Skizze an. Diskutiere insbesondere das Verhalten einer Masse, die sich auf einer Kreisbahn befindet und dann plötzlich 'abgeschnitten' wird."

Als Hinweis auf das Bezugssystem wurde ein Beobachter vorgegeben, der die Bewegung von außen betrachtet. Daß dieser Standpunkt akzeptiert wurde, zeigte sich daran, daß bis auf eine Ausnahme alle Schüler nach Abschneiden des Körpers von seinem Führungsfaden eine tangentielle Bahn einzeichneten.

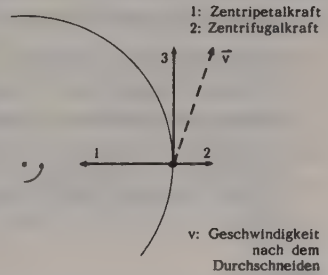
Obwohl im vorangehenden Unterricht in großer Breite genau die in der Aufgabe angesprochene Frage behandelt worden war, arbeiteten 10 von 17 Schülern mit

einer Kraft nach außen ("Zentrifugalkraft", "Fliehkraft"). Einige Schüleraussagen:

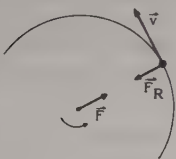
"Auf den Körper wirken 2 Kräfte ein: die Zentripetalkraft, welche vom Drehpunkt aus auf den Körper wirkt, und die Zentrifugalkraft, die vom Körper selbst ausgeht und diesen nach außen zieht."

"Auf die Masse wirkt eine Fliehkraft, die die Masse vom Drehpunkt 'weg-zieht'." (Eine Kraft in Richtung des Drehpunkts wurde von dem Schüler nicht genannt.)

Die dritte Antwort mit der nebenstehenden Skizze zeigt außer der Annahme einer Zentrifugalkraft auch sehr anschaulich eine Auswirkung des Präkonzepts 3-3: Bei Wegfall der Zentripetalkraft 1 bewegt sich der Körper in Richtung der Resultierenden aus den Kräften 2 (Zentrifugalkraft) und 3 (ohne Bezeichnung; Kraft in Bewegungsrichtung auf der Kreisbahn nach P3-2).



In einigen Antworten steht, die Zentrifugalkraft greife am Mittelpunkt des Kreises an. Im Unterricht war von der Gegenkraft zur Zentripetalkraft gesprochen worden, die auf den Befestigungspunkt des Führungsfadens ausgeübt wird. Die Tatsache, daß Wechselwirkungskräfte an paarweise verschiedenen Körpern angreifen, wird von den Schülern jedoch nicht berücksichtigt, und daher greift die Zentrifugalkraft nach ihrer Vorstellung gleichermaßen am Körper und am Befestigungspunkt an. Die Unterrichtsinformation der Existenz einer nach außen gerichteten Kraft, wird im Rahmen des Präkonzepts 6 auf den im Kreis bewegten Körper bezogen:



Eine Masse, die sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit bewegt, wird trotzdem immer zum Mittelpunkt hin beschleunigt. Auf die Masse wirkt die sogenannte Radialkraft $\vec{F}_R$ und die dazugehörige Gegenkraft $\vec{F}$: $\vec{F} = -\vec{F}_R$

Ein anderer Schüler schrieb:

"Eine Masse, die auf einer Kreisbahn gehalten wird, erfährt eine Kraft (Zentripetalkraft), die sie zum Mittelpunkt zieht. Dies ist jedoch nur möglich, wenn eine zweite Kraft als Gegenkraft (Zentrifugalkraft) die Masse vom Mittelpunkt nach außen zieht."

Interessant sind auch die Antworten auf eine zweite Klausuraufgabe, die lautete:

"Wenn bei einer Kreisbewegung ständig eine Kraft auf den betreffenden Körper einwirkt, nimmt dann dieser Körper nicht ständig an kinetischer Energie zu? Nimm Stellung!"

Neben drei korrekten Antworten (z.B. "Die Kraft ändert nur die Richtung, nicht den Betrag von v ") und vielen tautologischen ("Masse und Geschwindigkeit bleiben konstant, also ändert sich die Energie auch nicht") begründeten 5 Schüler die Konstanz der kinetischen Energie damit, daß die Zentripetalkraft durch die Zentrifugalkraft aufgehoben werde. Zwei Antworten:

"Die kinetische Energie wird nicht größer! Denn der einen Kraft (F_{Radial}) wird eine andere Kraft entgegengestellt und zwar $F_{\text{Zentrifugal}}$, F_Z und F_R gleichen sich gegenseitig aus, also nimmt die kinetische Energie nicht zu."

"Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft heben sich gegenseitig auf. So wirken bei konstanter Geschwindigkeit bei einer Kreisbewegung keine Kräfte, die Energie erzeugen. Der Körper kann sich nicht mit kinetischer Energie aufladen."

Appendix:

Eine andere Antwort zur zweiten Aufgabe zeigt die Kopplung von konstanter Kraft an konstante Bewegung, die wir unter P3-1 diskutiert haben. Danach ist zur Aufrechterhaltung einer Bewegung eine konstante Kraft erforderlich. Der Schüler hat den Text der Aufgabe 2 ganz offensichtlich nicht spezifisch auf die bereits bei Aufgabe 1 angesprochene Kreisbewegung bezogen, sondern aus dem Text nur die Stichworte Kraft und Bewegung aufgenommen, ohne sich über die Richtung der Zentripetalkraft (im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung) Gedanken zu machen. Die Kopplung von Kraft und Bewegung ist hier in einem tiefverwurzelten Grundschema aktiviert worden.

"Nein! Das würde ja heißen, daß er sich immer schneller drehen würde. Wenn eine gleichbleibende Kraft auf den Körper einwirkt, heißt das nur, daß seine Bewegung ständig gleichmäßig, ohne Beschleunigung verläuft. Es kann also auch nicht zu einer Zunahme der kinetischen Energie kommen, da diese sofort wieder in Bewegung umgesetzt wird."

B.3.4.3 Kenntnis 1: Erdbeschleunigung ist höhenabhängig

K1: Die Erdanziehungskraft bzw. die Erdbeschleunigung g nimmt mit der Höhe über dem Erdboden ab.

Bedeutung des Vorverständniselements

Die Kenntnis von Schülern, daß die Erdanziehungskraft und damit der Betrag von g mit zunehmender Höhe über dem Erdboden abnimmt, spielt bei der Interpretation zweier Phänomene eine Rolle: Zum einen wird die Zunahme der Geschwindigkeit fallender Körper mit einer Zunahme der Erdanziehungskraft in Zusammenhang gebracht. Dadurch ist das Phänomen der Temposteigerung im Rahmen des Präkonzepts 3-2 deutbar, nach dem Kraft und Bewegung gekoppelt sind. Zum anderen sehen manche Schüler die Ursache der "Schwerelosigkeit", die in Raumschiffen herrscht, darin, daß in so großer Höhe die Erdanziehungskraft quasi verschwinde.

Beide Auswirkungen treten zwar nicht allzu häufig auf; sie sind aber auch keine Marginalerscheinungen, wie z.B. ein Hinweis in Champagne 1980 zeigt (siehe Punkt C.2.6).

Diskussion des Elements an Beispielen

Schüler überinterpretieren die Höhenabhängigkeit der Gravitationskraft dahingehend, daß man sie auch bei Fallbewegungen mit geringen Höhendifferenzen berücksichtigen müsse. Die Kenntnis 1 wirkt hier zusammen mit dem Präkonzept 3-2 (s.o.) und dem allgemeinen Interesse 1 an Phänomenen "an sich", nach dem Schüler Wert auf die genaue Berücksichtigung aller möglicherweise bedeutsamen Faktoren legen.

Frank Wenn die Kugel fällt, wirkt die Erdanziehungskraft. Vielleicht sollte man mal ausmessen, wie hoch die ist, und dann die Höhe -

Oswald (unterbricht Frank) Aber welche Kraft nimmst du?

Frank Ausrechnen müssen wir an sich nur die Anziehungskraft und die Höhe zwischen Kugelabwurf und Boden.

Lehrer Das war eine klare Aussage von Frank. Was gibt es nun noch zu fragen?

Oswald Welchen Boden jetzt? Nimmt der diesen Klassenboden oder den Erdboden. Wir haben einmal festgestellt, daß mit zunehmender Höhe die Erdbeschleunigung abnimmt. Das muß man doch jetzt berücksichtigen, wenn wir das messen. Wir sind doch im ersten Stock.

Im zweiten Beispiel diskutieren Schüler, welcher Geschwindigkeitsverlauf bei der Bewegung eines Pappkegels zu erwarten ist, den man aus 2 Meter fallen läßt.

Herbert Ich glaube nicht, daß der schneller wird. Das ist doch wie ein Fallschirm. Oben in höheren Luftschichten, da wo die Luft dünner ist, da kann ich mir vorstellen, daß es da schneller wird. Aber bei uns ist das nur ein Unterschied von 2 Metern. Da ist der Luftdruck doch ziemlich gleich. Da müßte er doch eigentlich die gleiche Geschwindigkeit haben.

Thomas Das Objekt beschleunigt ja beim Runterfallen. Also wird es ja immer schneller. Weil - erstmal hat es ja diese Ausgangsposition, von der es anfängt. Und dann fällt es. Da ist es doch eigentlich logisch, daß es da immer schneller fallen muß. Aus dem Stillstand erreicht es ja nicht sofort die Höchstgeschwindigkeit.

Lutz Ich würde sagen, je näher es der Erde - dem Boden kommt, desto schneller wird es - dann wird ja auch die Erdanziehungskraft größer.

Lehrer Hast du das von deinem Bruder aus dem anderen Physikkurs?

Lutz Nein, das habe ich mir selbst ausgedacht.

Eine ähnliche Aussage wie die von Lutz schildert Champagne (1980, 1078). Wir haben in einer Fallstudie zu Denkraumen 1 eine Aussage angeführt, in der ebenfalls die Zunahme der Fallgeschwindigkeit auf die Zunahme der Erdanziehungskraft zurückgeführt wird und die hier abschließend wiederholt werden soll:

Dietrich Ich würde sagen, die Geschwindigkeit der fallenden Kugel nimmt immer zu. Die hat nicht irgendwann eine Geschwindigkeit erreicht, denn je näher sie dem Erdboden kommt, desto stärker wirkt sich auch die Erdanziehung auf sie aus. Dadurch beschleunigt die Kugel ständig.

B.4

Das thematische Vorverständnis zur Mechanik

(Kompaktdarstellung)

Die folgenden Seiten enthalten Kurzfassungen der Elemente des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik, die im Kapitel B der vorliegenden Arbeit entwickelt und diskutiert wurden. Neben stichwortartigen Beschreibungen ihrer Struktur sind wichtige Manifestationen der Elemente bei der Auseinandersetzung mit mechanischen Phänomenen angeführt.

DAS THEMATISCHE VORVERSTÄNDNIS ZUR MECHANIK - Kurzdarstellung

Komponente I: Denkraum und allgemeine Interessen

Bereich 1: Wesen physikalischer Erkenntnisgewinnung und Verhältnis von Theorie und Erfahrung

D1: Realisationsdenken

Durchdenken von Gedankenexperimenten oder von Aufgaben, für deren Bearbeitung bestimmte Abstraktionen vorausgesetzt sind, in vorgestellten alltäglichen Realisierungen des Prozeßverlaufs.

- Uminterpretation von Aufgabenstellungen, Einbeziehung von eigentlich zu vernachlässigenden Randbedingungen, insbesondere von Reibungseffekten
- unerschwerlich fungierender oder direkt geäußelter Widerstand gegen die Vornahme von Abstraktionen, die im Gegensatz zu Realitätserfahrungen stehen
- Realisationsdenken wird besonders bei qualitativen Problemstellungen aktiviert ("Denkaufgaben"), weniger bei "Rechenaufgaben", bei denen die Ermittlung von Zahlenwerten im Vordergrund steht

All: Interesse an Phänomenen an sich

Konzentration auf spezifische Aussagen über Einzelphänomene. Wenig Überlegungen im Hinblick auf verallgemeinerbare Begriffe/Prinzipien/Sätze.

- in SVUs Bevorzugung von Detailstudien an Einzelphänomenen ohne die Intention zur Erarbeitung verallgemeinerungsfähiger Aussagen
- genaues Hinsehen auf Feinheiten experimenteller Anordnungen oder demonstrierter Effekte statt Konzentration auf den "Kern der Sache"

D2: Aufgabe der Physik

Physik hat die Aufgabe, Realitätserfahrungen genau und am Einzelfall zu erklären.

- Forderung nach Orientierung der Unterrichtsinhalte an konkreten Phänomenen aus der natürlichen und speziell der technischen Umwelt
- weitgehende Gleichsetzung von Physik und Technik
- Kritik an der "Theorielastigkeit" und "Unanschaulichkeit" des Physikunterrichts

D3: Physik beschreibt ideale Laborwelten

Physikalische Erkenntnisse beziehen sich auf ideale Gedanken- und Laborwelten. Im Alltag kann man damit wenig anfangen.

- unterrichtlich behandelten Sachverhalten wird geringe praktische Relevanz zugemessen
- Annahme des getrennten Bestehens einer "Laborphysik" und einer Physik für "Normalbedingungen"
- ideale Gestalten werden auf sich selbst bezogen und zu einer speziellen Realität erhoben

D4: Physik liefert eindeutige Ergebnisse

Physik ist ein Kanon unumstößlicher Gesetze. Die Erkenntnisse werden aus genauen Experimenten abgeleitet.

- Glaube an die Eindeutigkeit physikalischer Untersuchungsergebnisse und die abschließende Beweisbarkeit von Gesetzen/Theorien
- empiristische Vorstellungen über die Erkenntnisgewinnung
- der theoretische Rahmen, in den Experimente eingebettet sind, findet weniger Beachtung als die Technik der Versuchsdurchführung

Bereich 2: Problemlösungsverhalten/Denkstrategien

D5: Eigenschaftsdenken

Physikalische Größen werden als körperbezogene Eigenschaften betrachtet.

- Gegensatz zum Wechselwirkungs- und Systemdenken
- Betrachtung von Geschwindigkeit, Kraft oder Gewicht als Körpereigenschaften
- keine Explizierung von Bezugssystemen (die Erdoberfläche oder die eigene Person fungieren als "natürliche" Bezugssysteme)

D6: Verursacher-Fixierung/Aktivitätsdenken

Orientierung der Beobachtung, Beschreibung und Erklärung von Vorgängen an den vermeintlichen Verursachern.

- Einteilung von Systemkomponenten in aktive, handelnde Teile und solche mit reagierender, passiver Rolle
- Konzentration auf die technischen Verursacher eines Vorgangs statt auf die physikalisch wechselwirkenden Körper
- Vorstellung, daß nur aktive Körper Kräfte ausüben können

D7: Zweckdenken

Berücksichtigung vermeintlicher Zwecke oder Ziele eines Vorgangs bei physikalischen Beschreibungen.

- aus Analogien zu lebensweltlichen Vorgängen werden physikalisch untersuchten Prozessen bestimmte Ziele oder Zwecke unterstellt und bei der Deutung der Vorgänge berücksichtigt

D8: Formelfixierung

Physikalische Kompetenz drückt sich in der Kenntnis von Formeln aus. Probleme werden durch Anwendung passender Formeln gelöst.

- Konzentration auf die Aneignung von Fähigkeiten zur formalen Anwendung von Sätzen
- Reduktion von Unterrichtsinhalten auf Formeln
- Bevorzugung von "Rechenaufgaben" in Klausuren (gegenüber "Denkaufgaben")
- Auseinanderfallen von Rechenfertigkeiten und Begriffsverständnis
- Zielsetzung in SVUs: Aufstellung einer Formel

D9: Analogiedenken

Versuch, die Antwort auf gestellte Aufgaben dadurch zu finden, daß man die Probleme auf vermeintlich äquivalente Fälle mit bekannter Lösung abbildet.

- Abspeicherung und Aktivierung bestimmter Lösungen für bestimmte Fälle statt allgemeingültiger Prinzipien der Mechanik

D10: Ursprungseinbeziehung/globales Denken

Einbeziehung des (gegebenenfalls rekonstruierten) Ursprungs einer Bewegung und ihres bisherigen Verlaufs in Überlegungen zu ihrer Beschreibung und die Vorhersage des Fortgangs.

- Vorstellung, Körper könnten eine durchlaufene Bewegungsform "speichern": Erhaltung der Kreisbewegung nach Wegfall der Zentralkraft
- Vorstellung, ein Körper speichere, während er in Bewegung gesetzt wird, eine Kraft, die er beim Stoß mit anderen Körpern austauschen könne ("Kraftübertragung")

Bereich 3: Schwerpunkte allgemeiner Interessen

A12: Interesse an Erkenntnisprodukten

Interesse an den Ergebnissen der Physik, weniger am Prozeß ihres Zustandekommens oder ihrer Herleitung aus Experiment und theoretisch-kreativer Spekulation.

- geringe Beachtung der Einführungsphasen in neue Themengebiete oder Begriffe sowie der Begründung/Herleitung von Gesetzen
- skeptische Betrachtung der "Lerneffektivität" prozeßorientierter oder offener Unterrichtsphasen ("process approach", z.B. SVU)
- Unbeliebtheit ideengeschichtlicher und wissenschaftstheoretischer Themen

A13: Interesse an technischen Fragestellungen

Bevorzugung praktisch-technischer Themenstellungen gegenüber der begrifflich-prinzipiellen Strukturierung von Phänomenen.

- Interesse an der konkret-technischen Funktionsweise von Geräten (geschlechtsspezifisch bei Jungen)
- Tendenz zum Verzicht auf die Nutzung physikalischer Prinzipien zur Strukturierung lebensweltlicher/technischer Phänomene

A14: Interesse am Experimentieren

Große Beliebtheit experimenteller Eigentätigkeit. Der Umgang mit Versuchsmaterialien stellt einen Wert an sich dar.

- Wunsch nach Möglichkeiten, selbst Versuche durchführen zu können
- Eigeninitiative und Kreativität bei der Entwicklung von Versuchsanordnungen
- der Zusammenhang von Versuchsdurchführung und Untersuchungsziel gerät leicht aus dem Blickfeld
- geringe Bereitschaft zur theoretischen Reflexion der geplanten oder durchgeführten Experimente

Komponente II: Präkonzepte und spezifische Interessen

Bereich 1: Kinematik

SI: Interesse an der Dynamik von Bewegungen

Bevorzugung dynamisch-energetischer Betrachtungen von Bewegungsabläufen gegenüber solchen unter kinematischen Aspekten.

- Widerstand gegen die Ausklammerung dynamisch-energetischer Aspekte bei Betrachtungen von Bewegungsabläufen in der Kinematik
- Schüler fragen eher nach dem "Warum/Wodurch" einer Bewegung als danach, wie sie verläuft
- Schüler bringen von sich aus dynamische Aspekte in kinematische Untersuchungen von Bewegungsabläufen ein

P1: Geschwindigkeit ist Schnelligkeit

Geschwindigkeit ist Schnelligkeit/Tempo.

- Reduktion der physikalischen Größe Geschwindigkeit auf ihren Betrag
- Richtungsänderungen werden als Zusatz zur eigentlichen Geschwindigkeit betrachtet
- Geschwindigkeit wird als Größe an den "sich bewegend" Körper gebunden (Außerachtlassung des Bezugssystems)
- mangelnde Differenzierung zwischen Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit
- Probleme mit der Unterscheidung von Punkt- und Intervallgrößen

P2: Beschleunigung als Bilanzgröße

Beschleunigung ist die Erhöhung (Änderung) des Geschwindigkeitsbetrages.

- Beschleunigung bilanziert die Tempoänderung, hohe Endgeschwindigkeiten sind ein Zeichen für große Beschleunigungen
- der Beschleunigungszeitraum ist gegenüber der Tempodifferenz eine zusätzliche, sekundäre Angabe (und kann durch die Beschleunigungsstrecke ersetzt werden)
- Richtungsänderungen werden nicht als Beschleunigung konzeptualisiert; die Kreisbewegung ist unbeschleunigt
- Körper können aus sich heraus (d.h. ohne Einwirkung einer äußeren Kraft) beschleunigen

Bereich 2: Dynamik

P3: Kraft als allgemeine Wirkungsfähigkeit

Alle mechanischen Vorgänge stehen unter dem prägenden Einfluß von Kräften. Körper können Kraft haben, Kraft ausüben, eine Kraft erfahren, Kraft speichern, verbrauchen usw. Kräfte sind die bestimmenden Antriebe für alle Veränderungen in den Konfigurationen der materiellen Dinge.

- Kraft wird auch nach Einführung des Newtonschen Kraftbegriffs als universelles Beschreibungs- und Erklärungsschema für mechanische Vorgänge verwendet
- die spezielle Bedeutung von "Kraft" prägt sich im jeweiligen Verwendungskontext aus
- "Kraft" und "Energie" sind zwei Namen für eine (potentielle oder aktivierte) "Wirkungsfähigkeit"
- wenn Schüler in Äußerungen zwischen Kraft, Energie, Impuls unterscheiden, verstehen sie darunter meist verschiedene Erscheinungsformen von etwas prinzipiell Gleichem (Clusterbegriff "Kraft")
- unabhängig davon erwerben Schüler die Fähigkeit zur Anwendung der richtigen Formeln in Standard-Klausuraufgaben

P3-1: Bewegte Körper haben Kraft

Körper, die sich in Bewegung befinden, besitzen eine Kraft, die von Masse und Tempo abhängt.

- ein in Bewegung befindlicher Körper hat eine potentielle Wirkungsfähigkeit, die beim Stoß mit einem anderen Körper aktualisiert wird
- die Kraft versetzt den Körper in die Lage, sich gegen Bewegungswiderstände durchzusetzen und andere Körper zu beeinflussen
- die Kraft wurde auf den Körper beim Vorgang des In-Bewegung-Setzens übertragen

P3-2: In Richtung der Bewegung wirkt eine Kraft

Wenn ein Körper sich bewegt, wirkt in Richtung der Bewegung eine Kraft. Ein Körper bewegt sich, solange die Bewegungs- bzw. Antriebskraft in der Lage ist, die Bewegungswiderstände zu überwinden.

- ein Körper bewegt sich nur, wenn eine Kraft wirkt
- ist keine äußere Kraft erkennbar, wird eine gespeicherte, innere Kraft konstruiert
- das Vorhandensein von Bewegungswiderständen (Reibungskräften) wird unausgesprochen und universell vorausgesetzt
- eine gespeicherte Bewegungskraft verbraucht sich im Verlaufe der Bewegung, und der Körper kommt zur Ruhe, wenn sie die Bewegungswiderstände nicht mehr überwinden kann
- Kräfte in Bewegungsrichtung werden insbesondere dann angenommen, wenn in einer Problemsituation eine Bahnkurve vorgegeben ist

P3-3: Bewegung in Richtung der Resultierenden

Die Bewegungsrichtung ergibt sich aus der Überlagerung aller wirkenden Kräfte.

- die Kräfte, die auf einen Körper einwirken (äußere und "innere"), überlagern sich zu einer Gesamtkraft, die die Bewegungsrichtung bestimmt
- die Aussage des zweiten Newtonschen Axioms wird als "graue Theorie" angesehen und auf Bewegungen unter "Normalbedingungen" (Reibungseinflüssen) nicht angewendet

P4: Kraftausübung als Aktivität

Nur aktive Körper können Kräfte ausüben. Passive Körper leisten Widerstand.

- nur bewegte, gespannte und belebte Körper können Kräfte ausüben (sowie die Erde und Magnete)
- Körper, die "nur so daliegen" (z.B. Tisch, Straße), üben keine wirklichen Kräfte aus, die andere Körper verformen oder beschleunigen können; sie leisten passiven Widerstand gegen angreifende Kräfte
- besondere Probleme bereitet Schülern die Vorstellung, daß passive Körper variable Kräfte ausüben
- actio und reactio beziehen sich auf den gleichen Körper; actio ist die aktive, angreifende Kraft; reactio ist eine passive Widerstands- oder "Gegenkraft" des Körpers
- "actio gleich reactio" gilt für den Gleichgewichtszustand; damit sich eine Wirkung zeigt, muß actio größer sein als reactio

P5: Kopplung von Trägheit, Gewicht und Reibung

Träge Masse, Gewicht/Erdbziehungskraft und Reibungskräfte sind in einem Widerstands-Konzept verknüpft, das alle Hemmnisse gegen die Bewegung oder das In-Bewegung-Setzen von Körpern umfaßt.

- bei vollkommener Kompensation des Gewichts und/oder der Reibung geht der Bewegungswiderstand auf Null zurück und der Körper kann durch beliebige kleine Kräfte stark beschleunigt werden; die Masse spielt dann keine Rolle mehr
- die Erdbziehung ist ein energieverzehrender Bewegungswiderstand; Körpern, die sich entgegengesetzt zur Erdbziehungsrichtung bewegen, wird ein Teil ihrer Energie unwiederbringbar entzogen

P6: Bei Kreisbewegungen wirkt Kraft nach außen

Ein Körper, der sich auf einer Kreisbahn bewegt, erfährt eine Kraft, die ihn nach außen zu ziehen versucht.

- die Kraft nach außen ("Fliehkraft") wird unabhängig vom Standpunkt des Beobachters, bzw. vom angegebenen Bezugssystem angenommen (und zwar an hervorgehobener Stelle)
- die Kreisbewegung wird als Gleichgewichtszustand angesehen (konstanter Abstand vom Drehpunkt), Fliehkraft und Zentripetalkraft halten sich die Waage
- das Präkonzept beruht auf sehr einprägsamen Erfahrungen bei schnellen Kurvenfahrten
- das Präkonzept ist äußerst stabil gegen Argumentationen auf der Grundlage der Newtonschen Axiome

Komponente III: Erfahrungen und Kenntnisse

E1: Bewegungswiderstände

Bewegungen unterliegen dem Einfluß von Widerständen.

- alle wahrnehmbaren Bewegungen erfolgen gegen hemmende Einflüsse
- Bewegungen ohne eigenen Antrieb kommen nach einer gewissen Zeit zum Stillstand
- das Aufrechterhalten einer Bewegung erfordert das ständige Wirken einer "aktiven" Bewegungskraft gegen die Widerstände (z.B. Körperanstrengung)

E2: Kurvenfahrten

Durchfährt man in einem Fahrzeug eine Kurve oder sitzt man in Karussells, so muß man sich festhalten, um nicht nach außen getragen zu werden.

- das "natürliche" Bezugssystem bei Kreisbewegungen ist das beschleunigte
- das Gefühl, "nach außen" gezogen zu werden, wird als das Wirken einer nach außen gerichteten Kraft gedeutet (vgl. Präkonzept 6)

K1: Erdbeschleunigung ist höhenabhängig

Die Erdbziehungskraft, bzw. die Erdbeschleunigung g nimmt mit der Höhe über dem Erdboden ab.

- Verwendung von K1 zur Erklärung der Zunahme der Geschwindigkeit beim freien Fall (im Rahmen von P3-2)
- Erklärung der "Schwerelosigkeit" in Raumschiffen durch die Annahme, in großen Höhen spiele die Erdbziehung keine Rolle mehr

Kapitel C

INTERNATIONALER FORSCHUNGSSTAND und
EINORDNUNG DER EIGENEN EMPIRISCHEN ERGEBNISSE

C.1

Einleitung

Im Kapitel C wird der internationale Forschungsstand über Schülervorstellungen im Bereich der Newtonschen Mechanik vorgestellt und mit den in Kapitel B dargelegten empirischen Ergebnissen verglichen. Das Kapitel ist folgendermaßen gegliedert:

1. Einzeldarstellung repräsentativ ausgewählter Studien über Schülervorstellungen zu Begriffen der Newtonschen Mechanik. (Punkt C.2)
2. Tabellarischer Überblick über die dort getroffenen Kernaussagen. (Punkt C.3)
3. Vergleich der Aussagen mit den in Kapitel B entwickelten Vorverständniselementen, Einordnung der eigenen Arbeiten in den Forschungsstand. (Punkt C.4)

Die Untersuchung von Schülervorstellungen und ihrer Bedeutung für das Lernen von Physik, ebenso wie für das Verstehen der Lernprozesse und -schwierigkeiten, hat sich zu einem zentralen Arbeitsgebiet der Fachdidaktik entwickelt. Jung (1979b) spricht von einem "Paradigma fachdidaktischer Forschung" und Aufschnaiter (1983) von einem sich entwickelnden "Kind-Paradigma" mit Forschungsprogrammen zur Analyse des Handelns und Denkens von Schülern in konkreten Lernumwelten. 1983 fand an der Cornell-Universität in Ithaca ein internationales Seminar mit über 100 Teilnehmern zum Thema "Misconceptions in Science and Mathematics" statt, dessen umfangreicher Tagungsband (Helm 1983) die Spannweite des Forschungsgebiets wiedergibt. Im Bereich der Präkonzeptuntersuchungen wird die klassische Mechanik am intensivsten bearbeitet. Die Literatur hat inzwischen einen beträchtlichen Umfang erreicht. Wir haben für die Synopse eine repräsentative Auswahl interessanter Arbeiten getroffen, die sich auf die Sekundarstufe II, bzw. College/Universität beziehen. Alle zwölf sind jüngeren Datums, was auf die Aktualität des Themas verweist.

Bei Mechanik-Untersuchungen wird, entsprechend seiner zentralen Stellung und wegen seiner Erwerbs-/Vermittlungsproblematik, dem Kraftbegriff besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Neun der zwölf vorgestellten Arbeiten befassen sich vorrangig mit Kraft-Vorstellungen. Daneben werden der Geschwindigkeit- und der Beschleunigungsbegriff aufgegriffen - hier besonders die Aspekte Vektorcharakter und Grenzübergang $\Delta v / \Delta t \rightarrow dv / dt$. Des weiteren findet das Trägheitskonzept Beachtung: einmal beim Verständnis von "träge Masse" und zum anderen im Zusammenhang mit Wurf- oder Fallbewegungen in gleichförmig bewegten Bezugssystemen. Über Schülervorstellungen zum Energiebegriff liegt eine umfangreiche, eigene Literatur vor, die Erhaltungs- und Verbrauchsvorstellungen, Energie als Bilanzgröße und das Verhältnis von Energie und Entropie beschreibt (Literaturhinweise dazu bei Schaefer 1980, Pfundt 1985). Einige Aspekte des Energiebe-

griffs spielen aber auch in den von uns zitierten Arbeiten eine Rolle, da Schüler "Kraft" teilweise in Bedeutungen verwenden, die dem physikalischen Energiebegriff näher stehen als dem Newtonschen Kraftbegriff (vgl. Präkonzept 3-1: "Bewegte Körper haben Kraft").

Ein tabellarischer Überblick über die Kernaussagen der ausgewählten Arbeiten (Punkt C.3), der gleichzeitig den generellen Forschungsstand umreißt, wird zeigen, daß sich die Ergebnisse gut ineinanderfügen. (Zum Vergleich können andere "Reviews" von Driver 1984 und McDermott 1984 eingesehen werden.)

Unter Punkt C.4 ordnen wir die eigenen empirischen Arbeiten in den Forschungsstand ein. Unsere Ergebnisse stellen im Bereich der Präkonzepte eine Bestätigung, Absicherung und Nuancierung des Erkenntnisstands dar. Im Bereich der Denkraumen und allgemeinen Interessen (Vorverständniskomponente I) erweitern unsere Arbeiten den Erkenntnisstand. Eine Bereicherung des Methodeninventars ist die Datenerhebung über umfangreiche empirische Begleitungen laufenden "Normalunterrichts", auf der unsere Untersuchungen wesentlich aufbauen, und die Ergebnisdarstellung anhand verzahnter Daten aus klassischen Tests und Unterrichtsprotokollen.

C.2

Untersuchungen über Schülervorstellungen zur Mechanik

Gegen Ende der 70er Jahre erschienen zwei wichtige Arbeiten über Schwierigkeiten von Schülern der Sekundarstufe II und von Studienanfängern beim Lernen der Mechanik, speziell beim Kraftbegriff. Die Monographie von Warren (1979) "Understanding Force" geht vom physikalischen Begriff aus. Nach einer Analyse der inhärenten Schwierigkeiten des Newtonschen Kraftkonzepts wird anhand empirischer Erhebungen nachgewiesen, daß viele Schüler Kraft nicht newtonsch verstehen - weniger wie sie den Begriff statt dessen verstehen. Viennot (1979; die Veröffentlichung beruht auf ihrer Dissertation von 1977) zeigt, daß wir alle (d.h. Forscher, Lehrer, Schüler) zur Mechanik über ein gemeinsames Erklärungsschema "intuitiver Physik" verfügen, das unabhängig von der Erteilung von Physikunterricht existiert, das sich als konsistentes Beziehungsgefüge im Alltag bewährt und das gegenüber Veränderungen durch Physikunterricht sehr resistent ist.

Neben diesen beiden Veröffentlichungen sind Arbeiten von Jung (1981a) und Schenk (1984) hervorzuheben. Schenk untersuchte die zeitliche Entwicklung von Konzeptualisierungs- und Formalisierungsfähigkeit in der Mechanik in Längsschnittstudien. Die Arbeitsgruppe um W. Jung erforschte, was Schüler sich inhaltlich unter den Begriffen der Newtonschen Mechanik vorstellen und ergründete die Tiefenstruktur der kognitiven Prozesse bei der Strukturierung von Wahrnehmung. Die Arbeit geht damit über die reine Feststellung von Lernschwierigkeiten hinaus. Die vier genannten Arbeiten spannen den Rahmen auf, in den sich die Veröffentlichungen über Schülervorstellungen zur Mechanik einordnen lassen:

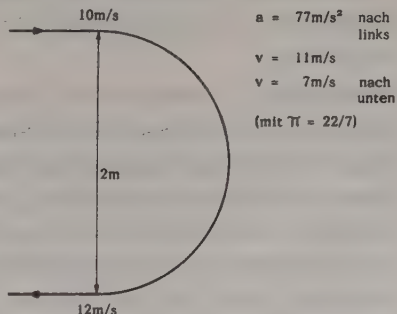
- Feststellungsanalysen: Welche typischen Lernschwierigkeiten gibt es in der Mechanik?
- Präkonzeptstudien: Wenn Schüler die Strukturen der klassischen Mechanik nicht erwerben, mit welchen Vorstellungen arbeiten sie dann?
- Ursachenanalysen: Auf welche tieferliegenden Denkstrukturen (Denkrahmen) lassen sich alternative Konzeptualisierungen der Mechanik zurückführen?

C.2.1

Warren (1979)

Warrens Monographie "Understanding Force" ist eine der meist zitierten Arbeiten über die inhärenten Probleme des Newtonschen Kraftbegriffs und die Schwierigkeiten seiner Vermittlung. Das Buch behandelt die Probleme vom physikalischen Begriff her - es nimmt seinen Ausgangspunkt nicht bei den Vorstellungen, die Schüler mit dem Begriff Kraft verbinden. Mögliche Beiträge zum Abbau der Verständnisschwierigkeiten werden in verbesserten Einführungs- und Behandlungsweisen oder geschickteren Schulbuchdarstellungen gesehen.

Im ersten Kapitel behandelt Warren die Kinematik. Besondere Probleme hätten Schüler in diesem Bereich mit dem Vektorcharakter der Begriffe Geschwindigkeit und Beschleunigung. Das nebenstehende Aufgabenbeispiel veranschaulicht die Unterscheidung zwischen dem skalaren Tempo und den Vektorgrößen $\vec{v}$ und $\vec{a}$. Der Schüler/Student wird gebeten, für den halbkreisförmigen Wegabschnitt die



Durchschnittsgeschwindigkeit und die Durchschnittsbeschleunigung zu berechnen. Richtige Lösungen werden laut Warren bei dieser Aufgabe praktisch nie erzielt.

Warren diskutiert ausführlich die 3 Newtonschen Axiome unter besonderer Berücksichtigung der konzeptuellen Schwierigkeiten.

Zum 1. Axiom:

Im Common sense-Denken mache man eine Unterscheidung zwischen Körpern in Ruhe und Körpern in Bewegung.

We know that we must make an effort to keep moving with respect to our immediate surroundings and therefore, deep down in our minds, we are convinced that force is needed to cause motion and that motion occurs in the direction of that force. Physicists make the quite different assumption that forces are needed only to change motion - an idea that is repugnant to 'common sense'.

(Warren 1979, 7f)

Überbleibsel der Bindung von Kraft an Bewegung und nicht an Bewegungsänderung fänden sich auch in Lehrbüchern. Warren zitiert Sätze wie "Wenn eine Kraft einen Körper bewegt ..." oder "Ein Körper wird durch seinen eigenen Impuls vorangetrieben".

Zum 2. Axiom:

Während im Anfänger-Unterricht eher die mathematischen Probleme im Vordergrund stünden, seien es auf höheren Stufen die der Physik des 2. Axioms. Warren nennt insbesondere die Unterscheidungen zwischen an unterschiedlichen Körpern angreifenden Einzelkräften sowie zwischen Einzelkräften und der Resultierenden, die durch ungeschickte Abbildungen in Lehrbüchern erschwert würden. Die physikalische Aussage, daß ein Automotor eine Reibungskraft von der Straße auf das Auto bewirke, werde von Schülern abgelehnt. Dies sei u.a. erklärbar durch die vorherrschende Behandlung von Reibungskräften als bewegungshemmend. Die meisten Physikstudenten meinten, der Motor übe eine Kraft direkt auf das Fahrzeug aus.

Zum 3. Axiom:

Warren wendet sich gegen Verkürzungen des 3. Axioms in der Form "Zu jeder Kraft gibt es eine gleich große, entgegengesetzt gerichtete Gegenkraft" oder "Jeder Kraft wirkt eine gleich große Reaktionskraft entgegen". Falsche oder zumindest mißverständliche Lehrbuchdarstellungen legten eine Vermischung von paarweise an verschiedenen Körpern angreifenden Kräften im Sinne des 3. Newtonschen Axioms und paarweise am gleichen Körper angreifenden gleichgroßen, entgegengesetzten Einzelkräften, die den Körper im Gleichgewicht halten, nahe.

Ausführlich beschäftigt sich Warren mit 'Scheinkräften'. Er betont, daß Phänomenbeschreibungen im Newtonschen System vollständig ohne die Konstruktion von Scheinkräften entwickelt werden können - allein unter Heranziehung realer Kräfte.

By 'real' we mean forces which arise from definable interactions between bodies subject to recognizable laws, and such that the various conservation laws of mechanics ... are applicable.
(Warren 1979, 13)

Er spricht sich dafür aus, diese Behandlung bei allen Problemen, einschließlich der Kreisbewegung, beizubehalten. Die sogenannten Scheinkräfte würden im Unterricht ohnehin nur bei Kreisbewegungen angesprochen. Sie entwickelten daher keine über den Einzelfall hinausgehende Funktion.

Von den sechs "special problems" (Gewicht, Verformung, Oberflächenspannung, Strahl und Rückstoß, Elastizität, Flüssigkeitsdruck), die von Warren diskutiert werden, greifen wir das Gewichts-Problem auf. Es wird im Unterricht besonders widersprüchlich behandelt. Die Gleichsetzung von Gewicht und Gravitationskraft führt nach Warren zu Verwirrungen, wenn gleichzeitig davon gesprochen werde, ein Körper drücke mit seinem Gewicht auf die ihn unterstützende Unterlage. Im Weltraum wäre man bei einer solchen Vorstellung von Gewicht in diesem

Sinne tatsächlich gewichtslos. Meist werde das Gewicht jedoch der Gravitationskraft gleichgesetzt. Das könne nun dazu führen, die sogenannte Schwerelosigkeit im Weltraum darauf zurückzuführen, daß der Astronaut sich außerhalb des Wirkungsbereiches der Erde befinde.

Warren referiert die physiologischen Effekte, die zum Gewichts-Gefühl führen und den Erwerb des Begriffs erschweren. Als Konsequenz aus der "Vagheit" des Begriffs schlägt er vor, ihn zu meiden und durch präzisere, wie etwa 'Gravitationskraft', zu ersetzen. (Bei Jung (1970, 42ff) finden sich weitere Ausführungen zur Behandlung des Gewichts-Begriffs.)

"Tests on Students"

Probanden der empirischen Erhebungen Warrens sind Studenten in Eingangskursen der Physik, Mathematik und Ingenieurwissenschaften. Warren bevorzugt in seinen schriftlichen Tests und Interviews Aufgaben, die durch verbale Beschreibungen oder Zeichnungen (z.B. von Kraftpfeilen) ohne Rechenaufwand bearbeitet werden können. Die Lösungen erfordern jedoch ein tiefes Verständnis der elementaren mechanischen Begriffe und Prinzipien. Die Aufgaben vermeiden Standardsituationen, die der Student aus den Physikkursen kennt und für die er sich an Musterlösungen erinnern könnte. Einige der Items hat Jung (1981a) deutschen Schülern und Studenten vorgelegt (mit im wesentlichen gleichen Ergebnissen).

Auf Warren geht auch die Denkaufgabe B1 unseres Tests DAM zurück (siehe B.2.2.2). Unsere Ergebnisse (vgl. B.3.3.2.3) stimmen genau mit denen überein, die Warren aus seinen Erhebungen schildert:

Nearly everyone shows gravity at A, but some students omit it at B. At A there is often shown a force in the direction of motion and occasionally an upward force equal to gravity. An upward force at B, usually called 'reaction', is shown in most cases. This force is commonly said to be equal to the weight of the ball. It should be obvious that this repulsive force must be very large, but hardly any students appreciate this.

In tutorial discussions following these tests students express their conviction that the 'reaction' at B must be equal in magnitude to the weight. When it is pointed out that a ball under zero resultant force would continue with constant speed in a straight path into the soil they are perplexed and usually have no idea how to resolve the difficulty. (Warren 1979, 33f)

Die Interpretation der Antworten werde durch die häufige Verwendung von Pfeilen erschwert, die offensichtlich keine Kräfte repräsentierten sondern Beschleunigung, Impuls, Energie oder Trägheit. Anschließende Gespräche hätten die Vermutung nahegelegt, daß einige Studenten alle diese Größen als im wesentlichen das gleiche wie Kräfte betrachteten.

Interessant ist Warrens Bericht über Reaktionen auf eine Aufgabe, bei der die Newtonschen Axiome aufgeschrieben und anschließend bei der Auseinandersetzung mit der Mechanik einer (a) auf dem Tisch liegenden und (b) im Fluge befindlichen Münze angewendet werden sollten. Von den schriftlichen Antworten habe keine einzige Bezug auf die Axiome genommen. Bei mündlichen Befragungen hätten die Probanden durchgängig versucht, irgendwelche anderen Konzepte, besonders 'Energie', für die Beschreibung heranzuziehen. Das 3. Axiom habe von fast keinem Studenten korrekt angewendet werden können. Fast alle hätten gemeint, die Münze bliebe auf dem Tisch in Ruhe, weil actio und reactio entgegengesetzt gleich seien.

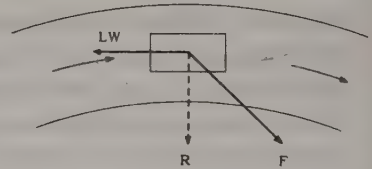
Das letzte Item, das wir hier darstellen wollen, lautet (mit Musterlösung):

Ein Motorfahrzeug fährt mit konstantem Tempo auf ebenem Boden durch eine kreisförmige Kurve. Es weht kein Wind. Machen Sie eine Skizze, die zeigt:

(a) einen Pfeil R, der die Resultierende aller am Fahrzeug in der horizontalen Ebene angreifenden Kräfte darstellt;

(b) einen Pfeil F, der die resultierende Reibungskraft darstellt, die vom Boden auf das Fahrzeug ausgeübt wird;

(c) weitere zu bezeichnende Pfeile, die andere Kräfte darstellen, die auf das Fahrzeug in dieser Ebene ausgeübt werden.



LW: Luftwiderstand

Der Anteil richtiger Beantwortungen dieser von Warren seit 1969 verwendeten Frage liegt unter 1%. Die wichtigsten Fehler:

- die Resultierende R zeigt in Vorwärtsrichtung (40%) oder radial nach außen (28%)
- die resultierende Reibungskraft F zeigt nach hinten (40%) oder radial nach außen (20%)
- neben der Luftreibung werden als weitere Einzelkräfte genannt: Zentrifugalkraft (40%), Zentripetalkraft (20%) und die "Fahrkraft" (25%). In den beiden letztgenannten Kategorien sind die Fälle nicht mitgezählt, die eine Komponente der resultierenden Reibungskraft in diesen Richtungen aufweisen. Es gab im übrigen keine korrekten Lösungen im Rahmen eines beschleunigten Bezugssystems.

Warren beschränkt sich auf eine Darstellung der Testergebnisse und die Feststellung, daß Schüler bestimmte Begriffe und Prinzipien nicht verstanden hätten. Er forscht nicht danach, wie die Schüler sie statt dessen verstehen - also im eigentlichen Sinne nach den Schüüervorstellungen. Einen anderen Ansatz verfolgt z.B. Jung (siehe C.2.12), der sich zum Ziel nimmt, "herauszufinden, was die angebotenen Inhalte für den Lehrer selbst bedeuten. Dies ist eine weite Frage-

stellung, insofern dabei auch emotionale Komponenten eingeschlossen sind" (Jung 1981a, 7).

Warrens Buch gibt wertvolle Anstöße durch die klare Aufzeigung der Probleme und Mißerfolge, Schülern die Mechanik begrifflich nahezubringen. Zudem werden einige wichtige Hinweise auf Verwirrung stiftende Behandlungsweisen der mechanischen Konzepte im Unterricht und in Lehrbuchdarstellungen mit Verbesserungsvorschlägen gegeben.

In seinem Resümee übt Warren Kritik an der vorherrschenden 'Rechenphysik' und plädiert für eine mehr begrifflich-qualitative Schwerpunktsetzung im Physikunterricht.

C.2.2

Viennot (1979)

Viennot will mit ihrer Arbeit zeigen, daß wir alle (d.h. Forscher, Lehrer, Schüler, ...) über ein gemeinsames Erklärungsschema "intuitiver Physik" verfügen, das unabhängig von - und vor erteiltem Physikunterricht existiert und das als ein in sich konsistentes Beziehungsgefüge Veränderungen gegenüber sehr resistent ist.

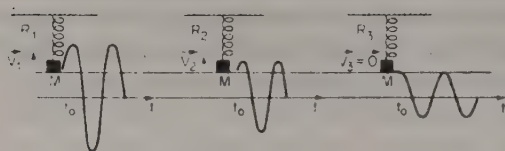
We shall show that such spontaneous reasoning is highly robust and that it outlives teaching which contradicts it. We shall also attempt to analyse in some detail how it works and what its consequences are. We shall see that it represents not just a few mistakes made by some students, but a way of thinking found in everyday conversation and in much that one reads; so much so that every one of us does, from time to time, reason in this way or, at least, has done so.

(Viennot 1979, 205)

Ausgehend von praktischen Lehrproblemen wird ein Beitrag zur Verbesserung des Unterrichts angestrebt. Dazu erklärt Viennot die Erforschung und systematische Darstellung der Denkweisen von Schülern, bzw. Studenten für zunächst erforderlich. Sie beschäftigt sich mit den Beziehungen zwischen Kraft, Energie und Bewegung im Rahmen der elementaren Dynamik.

Der besondere Wert von Viennots Arbeit liegt in einem Versuch, das intuitive Denken der Schüler in ein systematisches Schema zu fassen, das es erlaubt, Verhaltensweisen bei der Lösung von Denkaufgaben in Abhängigkeit von der Aufgabenstruktur vorherzusagen. Die Untersuchungsdaten wurden mittels 20- bis 30-minütiger schriftlicher Tests mit Schülern am Ende der Sekundarstufe II und mit Studenten in Anfangssemestern in Frankreich, Belgien und Großbritannien gewonnen. In den Aufgaben sind Vorhersagen über die Bewegung von Körpern

zu machen und wirkende Kräfte einzuzeichnen. Formelwissen oder mathematische Kenntnisse sind nicht erforderlich. Ein Aufgabenbeispiel:



Frage: "Sind die Kräfte, die auf die Masse M wirken, in allen 3 Fällen gleich?"

(In der Aufgabenstellung wird darauf hingewiesen, daß die Federspannung proportional zur Elongation ist.)

(aus Viennot 1979, 206)

Die Ergebnisse zu dieser Aufgabe weisen zusammen mit denen zu ähnlichen Fragestellungen auf das Vorhandensein eines "intuitiven Kraftgesetzes" hin, das Viennot folgendermaßen formuliert:

$$F = \alpha \cdot v$$

- a) wenn $v = 0$, dann $F = 0$ (auch wenn $a \neq 0$)
- b) wenn $v \neq 0$, dann $F \neq 0$ (auch wenn $a = 0$)
- c) wenn $v_1 \neq v_2$, dann $F_1 \neq F_2$ (auch wenn $a_1 = a_2$)

Das Kraftgesetz $F = \alpha \cdot v$ beschreibt nach Viennot einen Großteil der Untersuchungsergebnisse, jedoch nicht alle. So assoziierten die Schüler Beschleunigung zu Kraft bei Fragestellungen des Typs "Wenn die gleiche Kraft auf 2 identische Massen einwirkt, sind dann die Bewegungen notwendigerweise identisch?" Hier antworteten 80% der Erstsemester mit 'nein' und verwiesen auf die Bedeutung der Anfangsgeschwindigkeit.

Viennot geht davon aus, daß bei Schülern und Studenten zwei unterschiedliche Kraftvorstellungen nebeneinander existierten:

1. Kraft als Wechselwirkungskraft: $F_{WW} = m \cdot a$
2. Kraft als Kraftvorrat ("supply of force"): $F_{KV} = \alpha \cdot v$

Kraftvorstellung 1 werde angewendet, wenn die Kraft in der Richtung der Bewegung wirkt. Die Schüler sprachen dann von "der Kraft, die auf eine Masse wirkt". Außerdem käme F_{WW} dann zum Tragen, wenn die Aufgabenstellung keinen Anlaß für eine intuitive Einschätzung des Problems gebe.

Zu Vorstellung 2 gehörten Aussagen wie "die Kraft, die den Körper vorantreibt ...". Sie sei fest mit Bewegung verkoppelt und werde aktiviert, wenn die Bewegungsform vorgegeben oder einfach zu erkennen, bzw. vorzustellen sei (vgl. die obigen Fälle a), b) und c), sowie dann, wenn die Bewegungsrichtung nicht mit

der Richtung der tatsächlichen resultierenden Kraft zusammenfalle.

Die Kraftvorrats-Vorstellung erkläre das Vorhandensein von Bewegung durch die Verknüpfung der anfänglichen Ursache der Bewegung (Kraftwirkung) mit dem sichtbaren Effekt (Bewegung). Die Ursache gehe auf den Effekt über. Es liege häufig eine Vermischung von Kraft und Energie in einem "single and undifferentiated explanatory complex" vor (vgl. unser Präkonzept 3 "Kraft als universelle Wirkungsfähigkeit").

Im Zusammenhang mit beschleunigten Bezugssystemen tritt nach Viennot eine dritte Kraftvorstellung auf: "Trägheitskraft" (F_T). Trägheitskräfte würden auch dann angenommen, wenn das Phänomen in einem Inertialsystem betrachtet werde. Bei Kreisbewegungen werde völlig unabhängig vom Bezugssystem das Wirken einer Zentrifugalkraft vorausgesetzt. Viennot erklärt diese Denkweise bei der Beschreibung der Bewegung eines an einem Faden herumgeschleuderten Steins dadurch, daß die Schüler die Bewegung spontan als einen Gleichgewichtszustand kategorisierten (konstanter Radius). Für einen Gleichgewichtszustand seien nach den Schülervorstellungen zwei gleich große, entgegengesetzte Kräfte verantwortlich ("actio und reactio"):

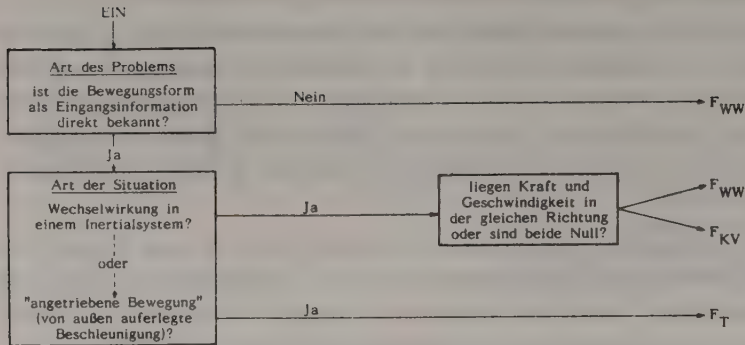
- a) die Fadenkraft, die auf den Stein wirkt (actio)
- b) die Zentrifugalkraft des Steins (reactio)

Zur Konstruktion von Kraft b), die für die Schüler notwendig sei, um das "Gleichgewicht" zu erklären, werde die tatsächliche Reaktionskraft des Steins auf den Faden in den Stein verlegt. Eine Bewegung kommt nach Schülermeinung dann zustande, wenn actio größer ist als reactio. Die Resultierende zeige in Richtung der Bewegung.

Die Schülervorstellungen zu actio und reactio erlauben nach Viennot einen Einblick in 2 generelle Tendenzen des spontanen Denkens:

1. Die Tendenz physikalische Größen (z.B. Kraft, Energie) den Körpern selbst zuzuschreiben.
2. Die Tendenz, eine Kraft in Richtung der Bewegung zu suchen, anzunehmen oder deren Notwendigkeit zu spüren, um das Vorhandensein von Bewegung zu erklären.

Die Abhängigkeit der Aktivierung der einzelnen Kraftvorstellungen von der Aufgaben- bzw. Problemsituation stellt Viennot im folgenden Flußdiagramm dar: (siehe nächste Seite)



Viennot zieht aus ihren Arbeiten die folgenden Schlüsse:

1. Im Rahmen des intuitiven Denkens werden inhaltlich unterschiedliche Konzepte mit gleichen Worten bezeichnet (z.B. "Kraft").
2. Die Wahl des herangezogenen Konzepts kann durch Klassifizierung der Aufgaben bzw. der Problemsituationen grob vorhergesagt werden.
3. In der Struktur des spontanen Denkens lassen sich 2 unterschiedliche Herangehensweisen für die Analyse von Bewegungen unterscheiden:
 - einen "lokalen" oder "statischen" Typ, der für die Beschreibung der Bewegung den augenblicklichen Ort oder Zustand der Körper analysiert und eher ein Wechselwirkungskraft-Schema aktiviert
 - einen "globalen" Typ, der die Entwicklung der Bewegung einschließlich ihres Ursprungs bis zum augenblicklichen Zustand mitberücksichtigt und eher eine Kraftvorrats-Vorstellung zur Folge hat.

Viennot verweist auf die Nähe des dargelegten intuitiven Denkschemas zur Impetustheorie. Das Schema sei keineswegs kindlich oder primitiv.

It represents a worked-out and effective system of thought, despite being in conflict with the yet more worked-out and effective Newtonian system. It deals without contradiction with most situations encountered in daily life.

(Viennot 1979, 213)

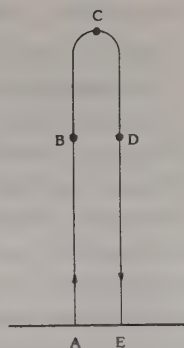
Das intuitive Schema zu überwinden oder zu korrigieren sei nur dann möglich, wenn die Unterschiede zum Newtonschen Schema thematisiert würden. Dazu müsse den Schülern geholfen werden, sich ihrer intuitiven Denkweisen bewußt zu werden.

C.2.3

Clement (1982)

John Clement betont zu Beginn seines Aufsatzes die grundlegende Bedeutung von "conceptual primitives" (Basiskonzepte wie Masse, Ladung oder Kraft; Grundprinzipien wie die Erhaltungssätze) für das Verständnis von Konzepten höherer Ordnung und stellt gleichzeitig fest, daß Studenten Probleme haben, solche Basiskonzepte auf qualitativer Ebene zu verstehen - abgesehen von zusätzlichen Schwierigkeiten mit der quantitativen Formulierung. Das Unverständnis der "conceptual primitives" könne jedoch von einer oberflächlichen Formelkenntnis und von formalen Rechenkalkülen überdeckt sein.

Clement zeigt, daß über den Zusammenhang von Kraft und Bewegung besondere fest verankerte qualitative Vorstellungen existieren, die er mit der Umschreibung "motion implies force" charakterisiert ("Bewegung schließt Kraft mit ein"). Datenquellen sind schriftliche Tests und gefilmte Interviews mit Physikstudenten über einfache mechanische Denkaufgaben. In der "Münzaufgabe" wird eine Münze vom Punkt A an senkrecht nach oben geworfen und bei Punkt E wieder aufgefangen. Es sollen die Kräfte eingezeichnet werden, die am Punkt B auf die Münze wirken.



Nur 12% der College-Erstsemester, die zu Beginn ihres Studiums der Fachrichtung Ingenieurwissenschaften befragt wurden, lösten die Aufgabe korrekt. Praktisch alle falschen Lösungen wiesen im Punkt B einen nach oben gerichteten Kraftpfeil auf. In Interviews nahmen 7 von 11 Studenten eine solche Kraft an. Sie wurde benannt als "Wurfkraft", "die Kraft nach oben, verliehen durch die Geschwindigkeit" oder "nach oben gerichtete Anfangskraft". Studenten, die nach einer Physikvorlesung befragt wurden, lösten die Aufgabe zu 25% richtig. Auch bei anderen Denkaufgaben (z.B. Kräfte auf eine Pendelkugel in verschiedenen Auslenkungen) ergaben sich nur geringe Zunahmen der korrekten Lösungen.

Clement zeigt sich überrascht über die Beständigkeit der Vorstellung "motion implies force":

What is surprising is the pervasiveness of the belief and the wide diversity of situations in which it shows up, once one begins to listen to students' common sense theories. (Clement 1982, 67)

Mit Interviewauszügen zur Münzaufgabe belegt Clement die fast wörtliche Übereinstimmung der Argumentationsweise der Studenten mit einer Beschreibung des

Phänomens, die Galilei in seinem Frühwerk 'De Motu' anführt. Danach überwiegt beim Aufstieg die anfängliche Wurfkraft (W) die Gravitationskraft (G), so daß sich der Gegenstand nach oben bewegt. Die Wurfkraft nimmt nach und nach ab, weil die Gravitationskraft nach unten zieht. Im Hochpunkt der Bahn sind W und G gleich groß. Danach bewegt sich der Körper nach unten, weil G überwiegt.

Clement verweist darauf, daß Galilei zwar später (in den 'Discorsi') von dieser Vorstellung abgerückt ist, ohne jedoch eine andere anzubieten. Galilei blendete die Frage nach der Ursache der Beschleunigung der Fallbewegung einfach aus.

Die folgenden 3 Punkte kennzeichnen die Vorstellung "motion implies force":

1. Eine andauernde Bewegung, selbst eine mit konstanter Geschwindigkeit, kann die Annahme bewirken, es sei eine Kraft in Richtung der Bewegung vorhanden, die auf den Gegenstand einwirkt und die Bewegung verursacht.
2. Solche "erfundenen" Kräfte kommen besonders bei der Erklärung von Bewegungen vor, die fortschreiten, obwohl eine entgegengesetzte Kraft wirkt. In diesem Fall wird angenommen, der Gegenstand bewege sich weiter, weil die "erfundene" Kraft größer ist als die entgegengesetzte.
3. Zur Erklärung von Schnelligkeitsänderungen gibt es die Vorstellung, solch eine Kraft "sterbe aus" oder "baue sich auf".

(vgl. Clement 1982, 69)

Die Vielfalt der Situationen, in denen die Vorstellung "motion implies force" zum Vorschein komme, lege nahe, in ihr eine Hauptquelle der Schwierigkeiten beim Lernen von Mechanik zu sehen. Die hohe Beständigkeit zeige sich in den Ergebnissen der Befragungen nach Absolvierung von Physikkursen.

Der von Clement eingeführte Gesichtspunkt, wonach der Übergang von der Impetustheorie zur Newtonschen Mechanik nicht nur zeitlich, sondern auch bezüglich der Umorientierung der Physiker lange gedauert hat, verweist auf die große Umdenkleistung, die wir von den Schülern in Mechanikkursen der Sekundarstufe II verlangen.

The "motion implies a force" preconception is not likely to disappear simply because students have been exposed to the standard view in their physics courses. More likely, Newtonian ideas are simply misperceived or distorted by students so as to fit their existing preconceptions; or they may be memorized separately as formulas with little or no connection to fundamental qualitative concepts. Discouraging as these implications may seem, it should be remembered that historically pre-Newtonian concepts of mechanics had a strong appeal, and scientists were at least as resistant to change as students are.

(Clement 1982, 70)

Clement hält es für notwendig, daß Studenten qualitative Fehlvorstellungen aussprechen und sich ihrer Präkonzepte bewußt werden. Nach seinen Erfahrungen sind Fragen über die Richtung und die relativen Beträge von Kräften, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in Problemaufgaben ohne Mathematisierung der Erreichung dieses Zieles besonders förderlich. Im Anschluß daran müßten die Präkonzepte und die anerkannten wissenschaftlichen Konzepte sowie überzeugende experimentelle Beobachtungen verglichen werden. Clement empfiehlt die Dialogtechnik der Lehrbücher Galileis als Modell für eine angemessene Unterrichtsstrategie.

C.2.4

Trowbridge (1980/81)

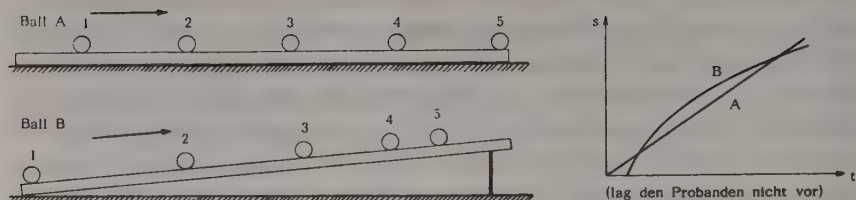
Aufbauend auf einer Dissertation über Schülervorstellungen zur Kinematik liegen zwei detaillierte Veröffentlichungen über das Verständnis der Begriffe Geschwindigkeit und Beschleunigung in einer Dimension vor (Trowbridge/McDermott 1980 und 1981). Die Arbeiten zeigen, daß verbreitet Lernschwierigkeiten zu den Konzepten bereits vor Einführung des Vektorcharakters bestehen, die schwer abzubauen sind. Probanden waren mehrere hundert Studenten der Eingangssemester an der University of Washington, die sich je nach Berufsziel in Physikkursen unterschiedlichen Anspruchs und Umfangs eingeschrieben hatten. Die Daten wurden in 20- bis 30-minütigen Experimentalinterviews sowie über schriftliche Prüfungsfragen erhoben.

Als Maß für das Verständnis kinematischer Begriffe wurde die Fähigkeit genommen, Geschwindigkeit und Beschleunigung als Verhältnisgrößen $\Delta s/\Delta t$ bzw. $\Delta v/\Delta t$ auf die Beschreibung einfacher Bewegungen realer Objekte, die in Demonstrationsexperimenten vorgeführt wurden, korrekt anzuwenden. Beim Vergleich des so gemessenen Verständnisgrades mit den Leistungsbeurteilungen in den Kursen ergaben sich übrigens keine durchgehenden Übereinstimmungen.

It has been our experience, however, that many students who can do well on conventionell test questions cannot correctly apply physical concepts to real situations.

(Trowbridge 1980, 1020)

In zwei Experimentalinterviewaufgaben zum Geschwindigkeitsbegriff waren die Studenten aufgefordert, die gleichzeitig ablaufenden Bewegungen zweier Körper in parallelen U-Schienen zu vergleichen. In den Aufgaben bewegte sich jeweils mindestens ein Ball ungleichförmig. Ein Beispiel: (siehe folgende Seite)



Der Interviewer fragte bei dieser Aufgabe danach, ob die beiden Bälle irgendwann gleiche Geschwindigkeiten ("speed": Tempo) hätten. Bei Befragungen sowohl vor als auch nach Unterricht über Kinematik benannte ein beträchtlicher Teil der Studenten dafür die Momente, in denen sich die Bälle begegneten. Bei Nachuntersuchungen lag der Anteil immer noch bei einem Viertel.

Nicht alle Probanden erkannten, daß Ball A sich gleichförmig bewegt und daß die Geschwindigkeit von Ball B sich von einem ursprünglich höheren auf einen unter dem von A liegenden Wert verringert. Und nicht alle, die das feststellen, wurden von solchen logischen Überlegungen davon abgehalten, dennoch zwei Zeitpunkte anzunehmen, an denen die Geschwindigkeiten übereinstimmen.

In den Abschlußklausuren der verschiedenen Kurse wurde danach gefragt, ob zwei Körper, die den gleichen Ort zum gleichen Zeitpunkt erreichen, zu diesem Zeitpunkt gleiche Geschwindigkeiten haben müssen. Die Studenten, die diese Frage falsch beantworteten, hatten in der Regel auch in den Experimentalinterviews gleiche Fehlvorstellungen geäußert.

In der Ergebnisdiskussion stellen Trowbridge/McDermott fest:

In both pre- und postcourse interviews, failure on the speed comparison tasks was almost invariably due to improper use of a position criterion to determine relative velocity. Although students who were unsuccessful could generally give an acceptable definition for velocity, they did not understand the concept well enough to be able to determine a procedure they could use in a real physical situation for deciding if and when two objects have the same speed. Instead they fell back on the perceptually obvious phenomenon of passing. Some identified being ahead or being behind as being faster or slower.
(Trowbridge 1980, 1027)

Das Verständnis des Begriffs Momentangeschwindigkeit zu einem Zeitpunkt erwies sich als besonderes Problem. Die Probanden scheiterten häufig am Grenzübergang von endlichen zu infinitesimalen Zeitintervallen. Nach Trowbridge/McDermott denken Studenten ohne vorhergehende Physikausbildung bei Geschwindigkeit an einen einfachen Zusammenhang zwischen zurückgelegtem Weg und dem dazugehörigen Zeitraum ("eine Stunde für 100 km"), nicht an eine Verhältnisgröße.

The interpretation of instantaneous velocity as a number referring to a single instant is a real conceptual hurdle for many students. (Trowbridge 1980, 1024)

Als Illustration ein Protokollauszug aus einem Interview:

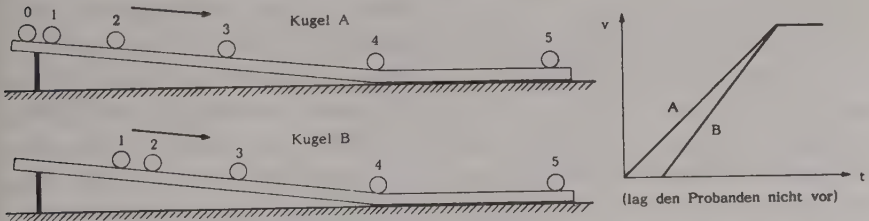
"Körper können nicht wirklich zu einem Zeitpunkt eine Geschwindigkeit haben, denn um die Geschwindigkeit zu berechnen, braucht man einen Zeitraum. Zu einem Zeitpunkt haben die Körper keine Geschwindigkeit, nur einen Ort."

(Trowbridge 1980, 1024; Übersetzung d.Verf.)

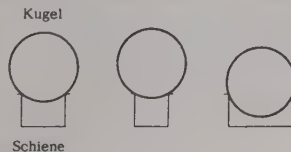
Trowbridge/McDermott ermittelten zur Geschwindigkeit in einer Dimension eine begrenzte Zahl begrifflicher Schwierigkeiten, die jedoch weit verbreitet und häufig sehr schwer abzubauen sind. Die bei den Untersuchungen zur Beschleunigung erforschten konzeptuellen Probleme können nicht in gleicher Weise auf ein oder zwei grundlegende Fehlkonzepte zurückgeführt werden. Der Anteil falscher Aufgabenlösungen war zudem größer als bei denen zur Geschwindigkeit.

Zunächst stellten die Autoren fest, daß einige Studenten die Umschreibung "Beschleunigung bedeutet Geschwindigkeitszunahme in einem Zeitintervall" so verstanden, als sei damit die Veränderung der Geschwindigkeit im Verlaufe eines Zeitintervalls gemeint, nicht die Differenz zweier Momentangeschwindigkeiten zu Beginn und am Ende des Zeitraums. Eine solche Vorstellung befähigt nicht zur quantitativen Auseinandersetzung mit Beschleunigungsvorgängen.

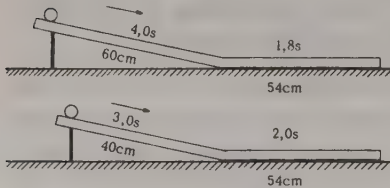
Das erste Demonstrationsexperiment zum Beschleunigungsvergleich zeigt zwei schiefe Ebenen mit Kugeln, die unter unterschiedlichen Beschleunigungen am Ende der Schienen auf gleicher Höhe und zu gleicher Zeit gleiche Endgeschwindigkeiten erreichen. Kugel A wird früher gestartet als Kugel B und legt bis zum Erreichen der Endgeschwindigkeit einen längeren Weg zurück.



Damit bei gleichen Fahrbahnneigungen unterschiedliche Beschleunigungen realisiert werden können, rollen die Kugeln auf U-Schienen unterschiedlicher Basisbreite.



Trowbridge/McDermott arbeiteten bei der Analyse der Interviewtranskripte 10 Argumentationstypen heraus, die in der nebenstehenden Tabelle hierarchisch geordnet sind (vgl. Trowbridge 1981, 247). Die Typen 1, 3 und 4 überwogen bei den falschen Antworten sowohl vor als auch nach Behandlung der Kinematik. In den Vor-Interviews wurde die Aufgabe nur von wenigen Studenten richtig gelöst. Etwa drei Fünftel verwechselten die Konzepte Geschwindigkeit und Beschleunigung. Nach Unterricht konnten, je nach Typ des belegten Physikkurses, 35% bis 70% die Aufgabe zumindest unter Hilfestellung lösen, aber nur etwa ein Drittel verwendete zum Vergleich der Beschleunigungen das Verhältnis $\Delta v/\Delta t$.



Typ	Begründung
1) $a_A = a_B$	gleiche Fahrbahnneigungen
2) $a_A = a_B$ oder $a_A \neq a_B$	je nach Lage der Endposition
3) $a_A = a_B$	gleiche Endgeschwindigkeiten
4) $a_A > a_B$	B wird von A eingeholt
5) $a_A > a_B$	A legt in gleicher Zeit einen größeren Weg zurück als B
6) $a_A = a_B$	A legt einen größeren Weg zurück als B, aber in längerer Zeit
7) $a_B > a_A$	B durchläuft die Geschwindigkeitsänderung auf kürzerer Strecke
8) $a_B > a_A$	die Geschwindigkeit von B holt die von A ein und ändert sich deshalb stärker
9) $a_B > a_A$	$\Delta v_B > \Delta v_A$ in gleicher Zeit Δt
10) $a_B > a_A$	Δv_B erfolgt in kürzerer Zeit als Δv_A

(vgl. Trowbridge 1981, 247)

In einer zweiten Aufgabe wurde schriftlich das quantitative Verständnis des Verhältnisses $\Delta v/\Delta t$ getestet. Gefragt wurde danach, welcher Ball die größere Beschleunigung erfahre. Um mechanisches Formelanwenden zu unterbinden, wurden die Studenten

darauf verwiesen, daß die Verwendung von $s = 1/2 a t^2$ nicht als Lösung akzeptiert werden würde; vielmehr solle die Definition der Beschleunigung verwendet werden. Aus dem Neigungswinkel konnte wiederum nicht direkt auf die Beschleunigung geschlossen werden (s.o.). Gut drei Viertel der Bearbeitungen (von insgesamt ca. 300 Studenten) waren falsch. Aus einigen zusätzlich durchgeführten Interviews gewannen die Autoren tiefere Einblicke in die Vorgehensweisen der Probanden. Der typische Fehler bestand darin, mittels der Formel $v = \Delta s/\Delta t$ für die beschleunigte Bewegung auf der schiefen Ebene eine (Durchschnitts-) Geschwindigkeit zu bestimmen, den Wert nochmal durch Δt zu teilen und als Beschleunigungswert heranzuziehen.

Wir interpretieren das Schülerverhalten dahingehend, daß kinematische Formeln, bzw. Schülerabwandlungen davon (" $v = s/t$ " statt $v = \Delta s/\Delta t$ oder " $v = s/t^2$ " aus Analogie zu $[v] = m/s^2$) angewendet wurden, ohne über deren Angemessenheit

in der speziellen Aufgabensituation nachzudenken. Die unreflektierte Anwendung von Formeln und Rechenoperationen korrespondiert mit einer auch explizit von Schülern geäußerten Vorstellung, nach der es in der Physik hauptsächlich auf die Formeln ankomme, die ganzen Ableitungen und das "Gerede" drumherum könne man schnell wieder vergessen (vgl. Denkrahmen 8 "Formelfixierung"). Diese Haltung wird durch die Konstruktion konventioneller Klausuren be- und verstärkt.

In einer zusätzlichen Untersuchung, die den eigentlichen Untersuchungsrahmen (Beschleunigung als Verhältnisgröße $\Delta v/\Delta t$) überschritt, sollte die Beschleunigung einer Kugel beschrieben werden, die eine schiefe Ebene hinauf- und wieder herunterrollt. Explizit wurde nach der Beschleunigung im Umkehrpunkt gefragt. Es bestand eine starke Tendenz, die Beschleunigung im Hochpunkt der Bahn als Null anzunehmen. Dazu ein Interviewauszug:

"Die Beschleunigung in dem Moment, wo der Ball zur Ruhe kommt, ist Null, weil die Geschwindigkeit Null ist und weil es keine Zeitänderung gibt. Beschleunigung würde vorliegen bei einer Geschwindigkeitsänderung in einer Zeitänderung." (Trowbridge 1981, 248; Übersetzung d.Verf.)

Neben dieser Argumentation wurde als Grund für die Beschleunigung Null angeführt, die Beschleunigung wechsele im Umkehrpunkt das Vorzeichen von plus nach minus und müsse daher Null durchlaufen.

Insgesamt kommen Trowbridge/McDermott zu dem Ergebnis, daß ein beträchtlicher Teil der befragten Anfängerstudenten die Konzepte Geschwindigkeit und Beschleunigung vermischt. Es fehle häufig am qualitativen Verständnis von Beschleunigung als Verhältnisgröße $\Delta v/\Delta t$.

Die begrifflichen Schwierigkeiten hätten sich als sehr resistent erwiesen. Beim Vergleich einzelner Studenten in Vor- und Nach-Interviews seien die falschen Vorgehensweisen oftmals identisch gewesen. Die vergleichsweise größten Lernzuwächse hätten sich in einem Kurs ergeben, in dem der Begriffsbildung besonderes Gewicht zugemessen wurde und in dem die Studenten in Übungen, Diskussionen und Praktika mit Situationen konfrontiert wurden, die die Trennung der verschiedenen kinematischen Konzepte beförderten.

Die Aneignung physikalischer Konzepte, so die Autoren, hänge stark vom Aufbau tragfähiger Verbindungen zu den mitgebrachten "Protokonzepten" ab. Typische Fehlvorstellungen sollten im Unterricht direkt angesprochen werden (vgl. Trowbridge 1980, 1028).

Arons berichtete über eine Reihe von Einzelergebnissen zu Lernschwierigkeiten von College-Studenten in einführenden Physikkursen und die zugrundeliegenden Fehlkonzepte. Als Untersuchungsmethode nennt er die Analyse schriftlicher Aussagen zu Testaufgaben und den "Sokratischen Dialog".

In this paper the term "Socratic dialog" is used in its classical sense, denoting a conversation in which an interlocutor asks his partner a sequence of questions eliciting a line of reasoning or inquiry without making didactic interpolation. (Arons 1981, 167)

1. Kinematik

Mit Verweis auf die Arbeiten von Trowbridge/McDermott nennt Arons als ein besonderes Problem das Verständnis des Begriffs Momentangeschwindigkeit. Für Schüler bezeichne der Terminus "momentan" einen kurzen aber doch endlichen Zeitraum, keinen Zeitpunkt. Vergleichbare Schwierigkeiten träten auf bei der Unterscheidung von Ort und Verschiebung. Eng damit verzahnt sei das Problem, Schülern zu vermitteln, daß im Umkehrpunkt eines Fadenpendels oder im Hochpunkt der Flugbahn eines vertikal nach oben geworfenen Balls der Körper beschleunigt wird, obwohl seine Momentangeschwindigkeit Null ist. Arons nennt als Ursache die Schulbuchausdrucksweise, der Ball komme im Umkehrpunkt "einen Moment zur Ruhe". Schüler verstünden das so, als stünde der Ball einen kurzen Augenblick still, bevor er wieder nach unten falle.

2. Kraftbegriff

Für Arons liegt im 3. Newtonschen Axiom der Schlüssel für das Verständnis des Kraftbegriffs:

The cutting edge of this concept, its capacity for penetrating and predicting motion, resides not in the primitive motor sensations of push and pull nor even in the second law connection among force, mass, and acceleration; it resides in the possibility of separating interacting particles by means of the third law and then applying the second law to one particle at a time.
(Arons 1981, 168)

Aus dem Sokratischen Dialog entnimmt Arons, daß Studenten das 3. Axiom aber gerade nicht so verstehen, daß bei einer Wechselwirkung zwei getrennte Kräfte auftreten, die an verschiedenen Körpern angreifen. Er kritisiert, daß in Lehrbüchern die wechselwirkenden Körper nicht klar voneinander getrennt gezeichnet würden, wodurch das Verständnis behindert werde.

Viele Studenten ließen an einem vertikal nach oben geworfenen Körper eine nach oben gerichtete Kraft angreifen, nachdem der Körper die Hand des Werfers verlassen hat (vgl. Clement 1982 unter Punkt C.2.3; Präkonzept 3-2 "In Richtung

der Bewegung wirkt eine Kraft", B.3.3.2.3). An einem Klotz, der zunächst reibungsfrei über einen Tisch gleitet und sich dann über die Tischkante hinüberbewegt, werde eine horizontal wirkende Kraft eingezeichnet (übrigens auch wenn während des Gleitens keine solche angenommen wurde). Die zugrundeliegenden Vorstellungen erinnerten an die mittelalterliche Impetus-theorie.

Nach Arons besteht zwischen der Richtigkeit von Kraftdiagrammen und der Fähigkeit zur rechnerischen Anwendung des zweiten Axioms nur eine geringe Korrelation. Viele Studenten lernten Rechenkalküle ohne irgendeine akzeptable Vorstellung von der Phänomenologie der Kraft aufzubauen.

Ein weiteres Lernhindernis stelle die tief verwurzelte "vitalistische" Vorstellung dar, nur belebte Körper könnten Kräfte ausüben. Diese komme in Äußerungen zum Ausdruck wie "Wie kann der Tisch auf das Buch eine Kraft ausüben? Er hat doch keine 'power'" (vgl. Präkonzept 4 "Kraftausübung als Aktivität"). Es gelänge Studenten ohne explizite Anleitung nicht, sich physikalische Effekte vorzustellen, die sich der direkten Anschauung entzögen (wie die Deformation des Tisches durch das Buch).

Die genannten Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen sind laut Arons in Einführungskursen weit verbreitet - gleichgültig ob die Studenten einen naturwissenschaftlichen oder anderen Abschluß anstrebten. Auch bei Physiklehrern der Sekundarstufe II habe er dieselben Probleme angetroffen (wobei darauf verwiesen werden muß, daß amerikanische Secondary Teachers keine der deutschen vergleichbare Ausbildung durchlaufen). Dies zeige, daß die Probleme im Studium nicht erkannt und abgebaut worden seien.

Eine Hauptquelle der Lernschwierigkeiten sieht Arons darin, daß die Studenten sich die Bedeutung der physikalischen Begriffe nicht klarmachten. Die Studenten würden viel zu selten dazu angehalten, Begriffe, Gesetze und Prinzipien in eigene Worte zu fassen. Lehrbuchaufgaben erforderten fast nie eine solche Artikulation.

It is blandly assumed that if the student can get the "answer" he must understand the physics. Socratic dialog reveals that this is most definitely not the case. (Arons 1981, 173)

Auch Arons konstatiert das Scheitern der Lehrweise, den Studenten (Schülern) die physikalische Theorie kompakt und geschlossen vorzutragen und plädiert dafür, die Lernenden ihre eigenen Denkweisen artikulieren zu lassen.

Didactic explanation and a concentrated remedial exercise do not help the majority of students overcome a cognitive difficulty. Much greater success is achieved through providing students with repeated opportunity, in slightly different situations, to trace the line of reasoning and articulate it in their own words, either orally or in writing. (Arons, 170)

C.2.6 Champagne (1980)

Champagne/Klopfer/Anderson untersuchten empirisch den Zusammenhang von vor-
unterrichtlichen Vorstellungen über Bewegungen, mathematischen Fähigkeiten
sowie der logischen Denkfähigkeit mit dem Lernerfolg in klassischer Mechanik.
Probanden waren 110 vorwiegend weibliche College-Studenten in einem einfüh-
renden Physikkurs an der University of Pittsburgh, die keinen naturwissenschaft-
lichen oder ingenieurwissenschaftlichen Abschluß anstrebten. Etwa zwei Drittel
davon hatten mindestens ein Jahr High School Physik gehabt.

Zu Kursbeginn wurden den Studentinnen und Studenten

- a) verschiedene einfache Demonstrationsversuche mit frei fallenden Gegenständen
sowie mit der Atwoodschen Fallmaschine vorgeführt, die sie beschreiben und
zu denen sie Fragen beantworten sollten,
- b) ein Test über ihre mathematischen Fähigkeiten in für die Physik besonders
wichtigen Bereichen vorgelegt und
- c) ein Test zur Überprüfung der logischen Denkfähigkeit unterbreitet.

Als Meßinstrumente für den Lernerfolg wurden zwei einstündige Klausuren wäh-
rend des Mechanik-Teils der Vorlesung und die auf Mechanik bezogenen Anteile
der Abschlußklausur herangezogen. Etwa die Hälfte der Klausuraufgaben erfor-
derte zu ihrer Bearbeitung die rechnerische Lösung eines quantitativen Problems.
Genauere Angaben über die Aufgaben sind der Veröffentlichung nicht zu ent-
nehmen.

Eine Schwäche des Untersuchungsansatzes von Champagne et.al. besteht darin,
daß zur Messung des Lernerfolges keine Denkaufgaben verwendet wurden, wie
Jung (1981a), McCloskey (1983) oder wir sie konstruiert haben. Dadurch kann
tatsächliches Unverständnis grundlegender physikalischer Begriffe unter formalen
Fähigkeiten zur Manipulation mit physikalischen Gesetzen verdeckt bleiben. Zum
anderen legt der Anteil quantitativer Aufgaben eine Korrelation von mathemati-
schen Fähigkeiten und so gemessenem Lernerfolg von vornherein an. Eine inhalt-
lich-qualitative Auswertung der Klausuren wurde nicht vorgenommen. Dennoch
zeitigte die Arbeit einige interessante Ergebnisse, besonders zu den Präkonzepten
über Bewegungen in den Eingangstests.

Hier die wichtigsten Resultate:

1. Unterscheidungsmerkmale "guter" und "schlechter" Studenten

Die erreichte Punktzahl im Vorstellungstest a) war nur ein schwacher Indikator
für den Lernerfolg ($r = 0,24$). Für eine kontrastive Gruppenanalyse wurden die
17 Probanden herangezogen, die entweder im Eingangstest a) oder in den Klau-

suren die höchsten Punktzahlen erreicht hatten, und die 18 Probanden mit den schlechtesten Ergebnissen. Der Vergleich ergab drei Felder, auf denen sich die Gruppen unterschieden:

- die Häufigkeit der Verwendung von Fachausdrücken
- die Häufigkeit, mit der sich die Studenten als reflexive Denker zu erkennen gaben, d.h. der Umfang, in dem über die eigenen Denkprozesse reflektiert wurde (im Eingangstest a)
- die Häufigkeit, mit der die Studenten darauf verwiesen, ihre Antworten beruhten auf Kenntnisse, nicht auf Beobachtungen.

Für uns steckt hinter dem letzten Spiegelstrich die Tendenz, von der unmittelbaren Wahrnehmung zu abstrahieren und die Phänomene bewußt nicht so zu sehen, wie sie sich dem "unbewaffneten" Auge darstellen. Wenn damit eine Neubewertung der Wahrnehmungen unter der Anleitung eines theoretischen Entwurfs der Natur einhergeht, ist eine wichtige Voraussetzung für die Aneignung des Satzgebäudes der modernen Physik erfüllt (vgl. Punkt B.3.2.1 und Denkrahen 1 "Realisationsdenken"; B.3.2.1.1).

2. Einzelergebnisse des Vortests a)

Es zeigte sich, daß die Probanden praktisch keine physikalischen Präkonzepte über Bewegungen mitbrachten.

We had expected initially that the frequency of "correct" answers would be high and that more detailed information about the students' conceptualizations would be obtained from the protocol analysis. However, the students demonstrated that they did not know the very basic relationships these key questions tested. These results were particularly surprising since about 70% of the students in the sample had studied high school physics, some for two years. (Champagne 1980, 1076)

Im einzelnen ergab sich :

- 1/5 der Probanden glaubten, ein frei fallender Körper erreiche instantan seine Maximalgeschwindigkeit und falle dann mit konstanter Geschwindigkeit
- etwa 4/5 glaubten, unter sonst gleichen Umständen fielen schwere Objekte schneller als leichte
- ebenfalls etwa 4/5 glaubten, an der Atwoodschen Maschine aufgehängte Körper, die sich näher am Boden befänden, seien schwerer als höher befestigte.

3. Schülertheorie zur Mechanik

Es wäre nun falsch anzunehmen, die Studenten hätten zu Beginn des Kurses keine Vorstellung über Mechanik besessen. Im Gegenteil: Wie sich in den obenan-

geführten Einzelergebnissen andeutete, besaßen die Schüler an Stelle der newtonschen aristotelische Vorstellungen, bzw. eine Impetustheorie. Champagne et.al. charakterisieren das "belief system" der Probanden durch 4 Regeln, die unseren Präkonzepten 3-1 und 3-2 entsprechen:

- i) Eine Kraft, die auf einen Körper wirkt, verursacht Bewegung.
- ii) Unter dem Einfluß einer konstanten Kraft bewegt sich ein Körper mit konstanter Geschwindigkeit.
- iii) Der Betrag der Geschwindigkeit ist proportional zum Betrag der Kraft, jegliche Beschleunigung ist auf eine Zunahme der Kraft zurückzuführen.
- iv) Bei Abwesenheit von Kräften befindet sich ein Körper entweder in Ruhe oder, wenn er sich bewegt (weil er Triebkraft gespeichert hat, während die Kraft wirkte), wird er immer langsamer (weil er die gespeicherte Triebkraft verbraucht).

(vgl. Champagne 1980, 1077)

In the everyday world with its ubiquitous friction, these rules provide a reasonable approximation of the behavior of objects. Moreover, given the insensitivity of the human eye for detecting that an object is accelerating, it is little wonder that acceleration does not hold a central role in the common-sense belief system about motion.
(Champagne 1980, 1077)

Champagne et.al. vergleichen die für das Erlernen der Mechanik unabdingbare Rekonzeptualisierung mit einer Kuhnschen Revolution:

It seems useful to view the students' preinstructional belief system and the course's target of mechanics as competing paradigms. (...) In this view, the arduousness of learning mechanics is expressed in the effort required as students shift their thinking from one paradigm to another. Paradigm shifts are not accomplished easily, neither in the scientific enterprise nor in the minds of students.
(Champagne 1980, 1077)

Das "belief system" der Studenten weise keinen dem Newtonschen System vergleichbaren inneren Zusammenhang auf. Die einzelnen Elemente seien eher lose verknüpft. Dadurch sei das "belief system" sehr anpassungsfähig: lokale Eingriffe bewirkten keine globalen Veränderungen. Die mangelnde Explizität und die lose Struktur stünden dem Auftreten von echten Krisen und dem Durchlaufen eines Paradigmenwechsels entgegen, der eine Ausschärfung des alten Paradigmas voraussetze.

Ein Beispiel für die Anpassungsfähigkeit des Systems sei zitiert: Nach Champagne et.al. nehmen die Studenten vor dem Unterricht überwiegend an, fallende Körper bewegten sich mit konstanter Geschwindigkeit, die vom Gewicht abhängen. Andererseits lernten sie in Physikkursen, daß fallende Körper beschleunigt wer-

den. Dieser Widerspruch sei von einem Studenten dadurch aufgelöst worden, daß er annahm, die Gravitationskraft und damit das Gewicht nähme bei Annäherung an die Erdoberfläche zu. Dieser Effekt erkläre die Zunahme der Geschwindigkeit (vgl. Kenntnis 1, Punkt B.3.4.3)

4. Korrelation zwischen Lernerfolg in Mechanik und mathematischen Fähigkeiten

Zwischen mathematischer Kompetenz und Lernerfolg in Mechanik besteht nach Champagne et.al. eine hohe Korrelation. (Das kann kaum verwundern, weil der Vorlesungsstoff und die Klausuren stark mathematisiert waren.) Eine Randbemerkung zeigt in welchem Umfang der Physikunterricht von mathematischen Problemen überdeckt wird.

It is noteworthy that an informal tabulation and analysis of the questions asked in the physics lectures show that half of the questions asked were about mathematics rather than physics.
(Champagne 1980, 1077)

Auch in dieser Studie wird in den Folgerungen für den Unterricht gefordert, die Vorstellungen der Studenten (Schüler) explizit denen der Wissenschaft gegenüberzustellen. Das reine, "elegante" Lehren der klassischen Mechanik habe sich als ineffektiv erwiesen. Unterrichtsmethodisch wird der Einsatz ausgewählter Originaltexte von Galilei und Newton empfohlen sowie der Einsatz von Computergraphik zur Demonstration des Verhaltens von Körpern in einer aristotelischen und in einer "reibunglosen" newtonschen Welt (vgl. Champagne 1980, 1078).

C.2.7

McCloskey (1983)

McCloskey stellt seinem Aufsatz "Irrwege der Intuition in der Physik" die zusammenfassende Aussage voran, daß der Intuition vieler Menschen zufolge bewegte Objekte ganz anderen Bahnen folgen, als denen, die die Gesetze der Newtonschen Mechanik vorschreiben. Die Fehlurteile stimmten jedoch überraschend genau mit spätmittelalterlichen Denkweisen überein.

McCloskey legte Studienanfängern in High Schools und Colleges eine Reihe von Fragen über das Verhalten bewegter Objekte vor, etwa über die Bewegung eines Balles, der an einer Schnur über dem Kopf kreist, wenn man die Schnur plötzlich losläßt. Von etwa 50 befragten Studenten nahmen ein Drittel eine gekrümmte Bahnkurve an (ein Student: "Man erzeugt durch das Schleudern eine Kraft, die ringsherum geht"). Da mehrere Befragte über konkrete Situationen berichteten, in denen sie nach dieser Vorstellung gehandelt hätten, wandte sich McCloskey

der Frage zu, welche Beziehung zwischen physikalischen Überzeugungen und praktischem Handeln besteht.

Die Diskrepanz zwischen dem spontanen, intuitiven Urteil vieler Menschen und der physikalischen Wirklichkeit mag etwas überraschen. Man erwartet eigentlich, daß der Mensch aufgrund ähnlicher Situationen im Alltag genügend Gelegenheit hat, sich ein genaues Bild über die Bewegungen von festen Körpern zu machen. Auch könnte man meinen, daß der Mensch von Natur aus in der Lage wäre, die allgemeinen Prinzipien der Bewegungen zu erfassen.
(McCloskey 1983, 88)

Eine praktische Aufgabe für die Studenten bestand darin, während des Laufens einen Ball so loszulassen, daß er ein auf dem Boden markiertes Ziel trifft. Etwa drei Viertel der Studenten ließen den Ball senkrecht über der Zielmarkierung los. Bei einem Vergleich mit Studenten nach Absolvierung eines Physikkurses reduzierte sich die Zahl auf immer noch etwa ein Viertel. Begründet wurde das eigene Handeln u.a. mit der Annahme, ein Gegenstand könne nur durch Stoßen oder Werfen einen "Impetus" erhalten, nicht aber durch passives Mitführen. Dies gelte auch bei hoher Geschwindigkeit des Objekt-Trägers.

Bei einer anderen praktischen Aufgabe wurde ein Viertel der befragten Studenten offensichtlich von der Annahme geleitet, ein mit der Hand auf einem Kreisbogen geführter Körper werde nach dem Loslassen seinen Kreisbogen fortsetzen.

McCloskey zieht ausführliche Parallelen zwischen den Vorstellungen, die das Denken und Handeln vieler Schüler leiten, und der mittelalterlichen Impetustheorie, die ebenfalls das Konzept des "Kreisismpetus" kannte (Kreisbewegung als Erhaltungsgröße). Bei Nachfragen zu den Lösungen vorgelegter elementarer mechanischer Probleme wurden zum Teil bis in Einzelheiten Argumentationsstränge der Impetustheorie vorgetragen. Ein Student zum Impuls eines rollenden Balles:

"Eine Kraft, die auf den Ball ausgeübt und auf ihn übertragen wurde, so daß der Ball während er rollt, jetzt eine bestimmte Menge Kraft hat. Das bewegte Objekt hat die Kraft des Impulses, und da es keine entgegengerichtete Kraft gibt, wird es weiterrollen, bis es durch irgend etwas aufgehalten wird." (McCloskey 1983, 96)

Andere Studenten meinten, ein Ball käme durch Verluste des "Impetus" ("Bewegungskraft") aufgrund von Reibung und Luftwiderstand mit der Zeit zur Ruhe.

Mehr als jeder Dritte aus der Testgruppe meinte zu einer Aufgabe, bei der eine Metallkugel mit hoher Geschwindigkeit über eine Klippe schießt, die Kugel werde jenseits der Kante eine gewisse Strecke auf einer waagerechten Geraden weiterfliegen, dann einer abwärts gekrümmten Linie folgen und schließlich senkrecht

nach unten fallen. Zur Begründung wurde angeführt, die Kugel beginne erst dann zu fallen, wenn die Schwerkraft gegenüber der "Horizontalkraft" das Übergewicht gewinne.

McCloskey wendet sich dann der Frage zu, wie es zur Bildung solcher Vorstellungen kommt, die zur Alltagserfahrung eigentlich im Widerspruch stehen müßten. Er findet in Computer-Bildschirm-Simulationen Belege für seine Hypothese, daß Bewegungen wie die einer im Lauf fallen gelassenen Kugel optisch falsch wahrgenommen werden.

Ein Objekt, das sich relativ zu einem bewegten Bezugssystem bewegt, kann eine Art optischer Täuschung auslösen - die Relativbewegung wird dann unter bestimmten Bedingungen (in bezug auf eine ruhende Umgebung) mißdeutet.

(McCloskey 1983, 97)

Zusammenfassend stellt McCloskey fest:

Allem Anschein nach benutzen viele Studenten eine intuitive Impetustheorie als Grundlage, um den Lehrstoff des Physikkurses zu ordnen. Dabei werden Einzelaussagen so zurechtgebogen und verzerrt, daß sie in das intuitive Impetuskonzept passen. (...) Insbesondere änderte sich kaum etwas an der Grundannahme, daß zur Aufrechterhaltung des Bewegungszustands eine Art Impetus erforderlich sei: 93 Prozent meinten das zu Beginn des Kurses, und 80 Prozent hielten auch danach an dieser Vorstellung fest. (McCloskey 1983, 99)

McCloskey berichtet abschließend von Erfahrungen an einer High School, bei denen Widersprüche von Schülervorstellungen zur Newtonschen Mechanik dadurch aufgedeckt und behoben werden konnten, daß die Schüler ausdrücklich nach ihren intuitiven Vorstellungen gefragt und die beiden Konzepte gegenübergestellt wurden.

C.2.8

Leboutet-Barrel (1976)

Leboutet-Barrel berichtet über eigene Fragebogenerhebungen zur Mechanik mit französischen Gymnasiasten. Er hält eingangs fest, daß die Begriffe Kraft, Leistung oder Geschwindigkeit, die bei Schülern vor dem Durchlaufen von Physikunterricht vorlägen, nur dem Namen nach etwas mit physikalischen Konzepten zu tun hätten.

Zu Beginn der Sekundarstufe würden Schüler praktische, anschauliche Gründe zur Erklärung des Verhaltens von Körpern anführen. Für das Anhalten einer Kugel, die über eine flache, glatte Oberfläche rollt, würden dingliche Hindernisse

verantwortlich gemacht - keine theoretischen Konzepte wie Reibungskräfte. Im Alter von 14 bis 15 Jahren ergibt sich nach Leboutet-Barrel eine Zunahme des zur Phänomenbeschreibung herangezogenen Wortschatzes und ein Wandel der Verwendung der Begriffe im Satzaufbau. Während vorher Kraft fast ausschließlich in der Objekt-Form auftrat ("Kraft haben"), nimmt nun der Gebrauch als Subjekt zu ("Kräfte wirken").

This means that pupils begin to be able to envisage the simultaneous actions of opposing forces, internal or external, on a body. They can also use standards of reference when making comparisons and begin to define concepts in terms of their characteristics rather than by means of subjective values.
(Leboutet-Barrel 1976, 464)

Dieser Wandel vollziehe sich auch ohne Erteilung von Physikunterricht. Der Gebrauch von Kraft als Körpereigenschaft gehe parallel dazu nur leicht zurück.

Der gleiche Fragebogen wurde 16 und 17 jährigen Gymnasiasten nach einem halben Jahr Physikunterricht vorgelegt. Es zeigte sich eine weitere Abnahme der Verwendung von Kraft in der Objekt-Form und ein leichter Anstieg der subjektivistischen Verwendung. Grundsätzliche Verschiebungen von einem intuitiven zu einem physikalischen Verständnis konnten nicht vermerkt werden.

Leboutet-Barrel zeigt mittels linguistischer Analyse die Persistenz des Konzepts "Kraft haben" bis in die Oberstufe sowie dessen Koexistenz mit dem subjektivistischen Konzept "Kräfte wirken". Er macht jedoch keine Angaben über den physikalischen Gehalt der verschiedenen Verwendungsformen. Aus dem subjektivistischen Gebrauch auf eine korrekte Kraftvorstellung zu schließen, ginge unserer Ansicht nach zu weit.

C.2.9

Whitaker (1983)

Whitaker legte 100 Studienanfängern an der Missouri-State-University zu Beginn einführender Physikkurse 6 Aufgaben zur Kinematik von Fall- und Wurfbewegungen vor, die sich an Gedankenexperimente Galileis im "Dialog über die Weltssysteme" (Galilei 1630) anlehnen (z.B. Fall eines Steins vom Mast eines fahrenden Schiffes). Der Prozentsatz richtiger Einzelantworten (Multiple choice mit 3 Auswahlantworten) schwankte bei den 6 Aufgaben über alle Studenten gemittelt zwischen 33% und 78%. Nur 25% der Befragten beantworteten alle drei Aufgaben richtig, die sich auf den freien Fall von Körpern in einem sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegenden Bezugssystem bezogen. 34% beantworteten diese Aufgaben durchgehend falsch. Aus den Begründungen, die von den Stu-

dentem für ihre Antwortwahlen gegeben wurden, läßt sich ersehen, daß zumindest die letztgenannte Gruppe eine aristotelische Vorstellung über den Zusammenhang von Kraft und Bewegung besaß (vgl. unsere Ergebnisse zu Aufgabe C des Tests DAM unter Punkt B.3.3.2.3).

They believe that forces are needed to maintain motion, and that once the force pushing an object horizontally is removed, the horizontal motion quickly disappears and the object falls vertically. Also implicit in this reasoning is the failure to recognize that the horizontal and vertical components of velocity ... are independent of one another. (Whitaker 1983, 354)

Ein gutes Viertel der Befragten schloß in die schriftlichen Antwortbegründungen den Luftwiderstand als Variable mit ein. In den Aufgabentexten war der Faktor mit keinem Wort erwähnt worden. In einem Item war die Reihenfolge anzugeben, in der ein 50 Pfund schwerer und ein gleich großer 5 Pfund schwerer Ball, die aus gleicher Höhe fallengelassen werden, am Boden ankommen. 17 von 100 Schülern bedachten explizit den Luftwiderstand - zumeist um die richtige Vorhersage zu treffen. Eine typische Schüleraussage: "Da die Bälle gleiche Größe haben, ist der Luftwiderstand derselbe. Daher kommen die Bälle gleichzeitig an". Auch bei dem Item "Stein fällt vom Schiffsmast" habe die Berücksichtigung des Luftwiderstands häufig eine Rolle gespielt. Es stehe zu vermuten, daß weitere Schüler, die dies nicht äußerten, den Luftwiderstand bei der Beantwortung mitbedacht haben. Whitaker regt an, bei Untersuchungen im Bereich Mechanik die Bedeutung, die Schüler der Reibung zumessen, im Auge zu behalten.

If students are specifically instructed to ignore air friction, will they? The possible role that air friction plays in a student's response to these questions is an important one, and needs to be clarified in future research.

(Whitaker 1983, 355) (siehe dazu Punkt C.4.3)

Mathematische Kenntnisse spielten für das Antwortverhalten in Whitakers Studie keine Rolle. Studenten mit Kenntnissen in der Infinitesimalrechnung zeigten keine signifikant besseren Ergebnisse als Studenten ohne. Der Besuch von Physikunterricht auf der High School erhöhte den Korrektheitsgrad nur mäßig.

Whitaker kommt zu einer klaren Forderung:

Students must be given the opportunity to examine and be aware of the ways in which they think about these concepts prior to the introduction of a more formal analysis of them. This was clearly the approach that Galileo, through the voice of Salviati, took in the Dialogue. (Whitaker 1983, 356)

Der Autor berichtet über eigene Erfolge mit einer solchen Vorgehensweise, bei der der newtonsche Standpunkt erst nach Thematisierung der Schülervorstellungen eingebracht wurde.

C.2.10

Watts (1983)

Auf der Methode "interviews about instances" (IAI) beruht eine Studie zum Kraftbegriff von Watts (1983). Schülern wurden Karten mit Strichzeichnungen zu einem Schlüsselbegriff vorgelegt, die verschiedene Situationen (instances) darstellten. Die Schüler sollten die Karten unter Angabe von Gründen in Beispiele für und gegen ein Schlüsselwort einteilen (z.B. zum Schlüsselwort 'force': Astronaut umkreist in Raumkapsel die Erde). Probanden waren zwölf 11- bis 18-jährige Londoner Schüler.

Wir beschränken uns auf die Wiedergabe einiger markanter Ergebnisse. Die von Watts vorgenommene subtile Klassifizierung der Kraftvorstellungen in acht "alternative frameworks" wirkt eher verwirrend als informativ.

- Schüler vermischen Kraft und Energie (z.B. in der Vorstellung, eine gespannte Feder habe Kraft)
- Kraft wird als einem Körper innewohnende Fähigkeit verstanden, eine Wirkung zu erzielen
- Von Kraftausübung wird erst gesprochen, wenn eine merkliche Wirkung (z.B. sichtbare Verformung) auftritt
- Nur aktive Körper können Kräfte ausüben
- Eine Bewegung ist eine Kraft, die sich beim Zusammenstoß zeigt
- An einem bewegten Körper wirkt eine Kraft in Bewegungsrichtung
- Kräfte wirken immer durch ein Medium (Ablehnung der Fernwirkung)

C.2.11

Schenk (1983)

Barbara Schenk untersuchte die Entwicklung physikalischer Kompetenz bei Schülern der Sekundarstufe II anhand von umfangreichen Evaluationsaufgaben (inhaltlich zusammenhängende Aufgabenpakete jeweils mit theoretischem und praktischem Teil). Einzelne Schüler wurden durchgehend über längere Zeiträume beobachtet (Lernerbiographien). Wir konzentrieren uns hier auf die Ergebnisse im Themenbereich Mechanik für Gymnasiasten (Leistungskursanwärter) und Kollegschüler (Bildungsgang Physikalisch-Technischer Assistent; Schenk 1983).

Schenk unterscheidet vier Niveaus der Konzeptualisierungsfähigkeit Mechanik (KM):

KM0: Vermeidung jeglicher mechanischer Konzeptualisierung

- Versuch, die anstehenden Aufgaben rein über Formeln und Rechnungen zu lösen

- verbale Erläuterungen beschränken sich auf die Wort-für-Wort Übersetzung von Formeln

KM1: maximal alltagstheoretische Strukturierung der vorgelegten Sachverhalte
Der Begriff "Alltagstheorie" wird folgendermaßen erläutert:

Alltagstheorien sind generative Strukturen, die das Beobachten, Erklären und Handeln physikalisch ungeschulter Erwachsener in alltäglichen Situationen anleiten. (...) Sie sind zutreffend auf Realität, sie sind logisch gültig - innerhalb einer Alltagstheorie gibt es keine logischen Widersprüche! - und sie haben soziale Geltung - sie sichern sprachliche Verständigung zwischen allen vernünftigen Erwachsenen. (...) Aber, verglichen mit physikalischen Theorien, ist der Grundbereich einer Alltagstheorie relativ klein.
(Schenk 1983, 2f)

Besondere Kennzeichen von KM1 sind:

- die Aufrechterhaltung einer Bewegung oder Höhenlage erfordert Kraft/Energie
- gleichzeitig hat eine Bewegung bzw. Höhenlage eines Dings Kraft/Energie
- Energie ist eine momentane Stärke, ein Arbeitsvermögen, das sich in seiner beobachtbaren Wirkung manifestiert
- "Geschwindigkeit" impliziert "Schwung" oder "Kraft", Bewegung und bewegte Masse werden nicht getrennt gesehen

KM2: Erste strukturelle Veränderungen an den Alltagstheorien der Bewegung schwerer Dinge

- Bewegungsänderungen erfordern Kraft/Energie
- Kraft/Energie ist die Fähigkeit, dynamische Wirkung zu erzielen
- Energie ist eine qualitative Größe, nicht die quantisierte Fähigkeit, Arbeit zu leisten
- die Bilanz eines Arbeitsprozesses ist die Leistung

KM3: zutreffende Beschreibung eindimensionaler Bewegungen unter dem Einfluß von Kräften (bei konstanten Beschleunigungen)

- Arbeit kann bilanziert und mit Energieumwandlungen in Zusammenhang gebracht werden

KM3 ist laut Schenk noch nicht die volle Beherrschung der Newtonschen Dynamik. Zwei-Körper-Systeme sowie mehrdimensionale Bewegungen könnten nicht korrekt beschrieben werden.

Von der Konzeptualisierungsfähigkeit wird die Fähigkeit zur formal richtigen Lösung von Klausuraufgaben unterschieden.

Es (gibt) für jede Stufe ein bestimmtes Wissen und bestimmte Fertigkeiten, die zwar in ihrer Bedeutung relativ zur physikalischen Theorie verzerrt werden, aber in der symbolischen Darstellung korrekt wiederge-

geben werden können. Sie werden noch nicht "richtig" verstanden, aber im Kontext von Aufgaben, deren Strukturierung das Niveau KM3 verlangt, bereits formal richtig eingesetzt.
(Schenk 1984, 117)

Schenks Evaluationsaufgaben sind geeignet eine solche Differenzierung der physikalischen Kompetenz in Konzeptualisierungs- und Formalisierungsfähigkeit (FM) vorzunehmen, da sie neben formalen Berechnungen die qualitative Erfassung physikalischer Sachverhalte erfordern. Dazu ein Beispiel aus der Evaluationsaufgabe 2:

Überlegen Sie, wie die Energie des Rheins möglichst vollständig zum Antrieb von Wasserkraftwerken aus dem Rhein gezogen werden kann.

Beantworten Sie als Hilfe oder als Ergänzung die folgenden einzelnen Fragen:

- a) Warum wird ein Fluß begradigt oder kanalisiert, wenn man die Energieausbeute erhöhen will?
- b) Wieviel mechanische Antriebsenergie für einen Generator kann max. gewonnen werden, wenn 1 m^3 Wasser 1 m tief herunterläuft?
- c) Wie könnte man die "Wasserkraft" des Rheins vor dem Rheinfall möglichst vollständig ausnutzen?

(aus Schenk 1982a, 133)

Schenk berichtet über die Bearbeitung der Aufgabe in 30-minütigen Gruppendiskussionen am Ende eines Mechanikkurses der 11. Klasse folgendes:

Die formale Aufgabe (b); d.Verf.) wurde kompetent gelöst. Bei der Planung des Kraftwerks (c); d.Verf.) dagegen traten in allen Gruppen Schwierigkeiten auf, obwohl Schleusen, Wehre und Turbinen bekannt waren. Die Schüler waren nicht in der Lage, in dem am Wehr angestauten und entsprechend langsamer fließenden Wasser ein Energiereservoir zu sehen.

(Schenk 1982b, 133)

Die nutzbare Wasserenergie wird eindeutig im "Schwung" gesehen, also in der Bewegung des Wassers. Staustufen allerdings würden diesen Schwung vernichten.

(Schenk 1982b, 134)

Hier zeigt sich klar eine Diskrepanz zwischen formalen und konzeptuellen Fähigkeiten, die sonst oft unter Klausur-Rechenaufgaben verdeckt bleibt. Schenk schreibt, der Begriff potentielle Energie bereite den Schülern am Ende der 11. Klasse mehr Schwierigkeiten als der der kinetischen Energie, die näher am Bewegungs-/Schwung-Konzept liege. Dennoch könnten Aufgaben zur potentiellen Energie richtig gelöst werden, wenn sie auf der formalen Ebene blieben.

Betrachten wir die Ergebnisse zur Einstufung der Gymnasiasten und Kollegs Schüler in die Konzeptualisierungsniveaus Mechanik nach ca. 4 Monaten Mechanikunter-

richt (Tabelle rechts). Bis zum Ende des Mechanikcurriculums bleibt laut Schenk bei der Hälfte der Schüler die KM stabil, bei der anderen Hälfte sei ein Zuwachs zu verzeichnen und zwar besonders bei Schülern mit schwachen Fähigkeiten. Schüler mit guten Eingangsqualifikationen erlitten eher Rückschritte.

KM	Gym.	Koll.	Ges.	%
0	7	8	15	23%
0 → 1	0	2	2	3%
1	13	9	22	34%
1 → 2	2	1	3	5%
2	7	8	15	23%
2 → 3	2	2	4	6%
3	2	1	3	5%
N	33	31	64	100%
KM	1,2	1,1	1,2	

(vgl. Schenk 1983, 3)

KM	Ges.	%
0	13	26%
0 → 1	1	2%
1	13	26%
1 → 2	5	10%
2	11	22%
2 → 3	5	10%
3	2	4%
N	50	100%
KM	1,2	

(vgl. Schenk 1983, 7)

Bei einer Reihe anderer Schüler wurde die KM in der Jahrgangsstufe 13 erhoben. Es ergab sich das folgende Bild (Tabelle links): Ein Viertel aller Schüler vermeidet jegliche physikalische oder alltagstheoretische Konzeptualisierung mechanischer Begriffe (KM0). Physik wurde hier rein als Formelwissen gelernt. Man

beachte nochmals: KM0 bedeutet nicht, die Schüler könnten keine konventionellen Klausuraufgaben lösen!

Ein rundes Drittel hält konsequent an den Alltagstheorien der Mechanik fest (KM1). Nur sehr wenige Schüler kommen über KM2 hinaus. Es gibt jedoch bereits zu Beginn des Mechanikcurriculums Schüler, die sich auf KM3, bzw. auf dem Übergang dazu befinden. Im Gesamturteil muß man feststellen, daß es dem Physikunterricht kaum gelingt, Schülern zum Aufbau physikalisch korrekter Begrifflichkeiten in der Mechanik zu verhelfen.

Die Formalisierungsfähigkeit liegt in der Regel höher als die KM - besonders bei Gymnasiasten. Dies deutet wiederum auf die Gefahr hin, daß konzeptuelle Defizite bei Schülern unter der formal richtigen Lösung typischer Klausuraufgaben, die meist mehr Rechnungen als Begriffsverständnis abtesten, verborgen bleiben. Zur Erhellung dieses Sachverhalts trägt die Arbeit Schenks besonders bei.

C.2.12.

Jung (1981)

Die detaillierteste Untersuchung aus dem deutschsprachigen Raum über "Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik" (Jung 1981a) wurde von der Frankfurter Arbeitsgruppe um Walter Jung vorgelegt. Es waren die Arbeiten Jungs, von denen wir bezüglich der Erforschung der Komponente II des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik die meisten Anregungen bekommen haben. Zwischen seinen Ergebnissen und den von uns ermittelten und im Kapitel B dargestellten Präkonzepten besteht in vielen Bereichen Übereinstimmung.

Jung bezog seine Daten aus strukturierten Probleminterviews und schriftlichen Befragungen. In den Erhebungen (8. bis 13. Klasse) lag der Schwerpunkt auf der Fähigkeit von Schülern, physikalische Sachverhalte, speziell Alltagsphänomene, begrifflich zu erfassen. Gesetzes- oder Formelkenntnisse sowie mathematische Kompetenz wurde nicht getestet.

Unser Interesse bei den Untersuchungen ... richtete sich darauf herauszufinden, in welcher Weise Schüler Situationen konzeptualisieren, wobei sie genau wissen, daß sie sie physikalisch sehen sollten. Verfügen sie über die Fähigkeit, die Situation physikalisch zu repräsentieren? Haben sie die richtigen Vorstellungen über die physikalischen Begriffe? Erreichen sie das richtige Niveau der Allgemeinheit und Abstraktion, das dafür erforderlich ist? Verfügen sie überhaupt über ein gegen das Alltagsdenken deutlich abgesetztes physikalisches Begriffssystem? (Jung 1981a, 2f)

Dabei gehe es nicht darum festzustellen, ob ein physikalischer Begriff bei den Schülern in richtiger Repräsentation vorläge, sondern wie die Schüler den Begriff verstünden - einschließlich emotionaler Komponenten. Als Beispiel nennt Jung die enge assoziative Verbindung von "Stoß" zu "Unfall", "Hinfallen" usw.

Begriff "Trägheit"

Jung fand 4 Typen von Trägheitsvorstellungen (vgl. Jung 1981a, 13f):

- 1) Trägheit als eine Art Kraft/als zu überwindender Widerstand
- 2) Trägheit als Schwelle (Vermischung mit Haftreibungsphänomenen)
- 3) Trägheit gleich "Lahmheit"
- 4) Trägheit als nicht quantisierbarer Zustand

ad 1:

In den schriftlichen Befragungen (8. und 10. Klasse) wurde Trägheit häufig als Gegenkraft aufgefaßt. Gegenkräfte sind in der Schülersicht nur bedingt "eigentliche" Kräfte - eher Widerstände, weil sie passiv auf andere Kräfte reagierten.

"Echte" Kräfte könnten nur von aktiven Körpern ausgeübt werden (vgl. Jung 1981a, 43; vgl. Präkonzept 4, Punkt B.3.3.2.4)

Wenn Trägheit als Trägheitskraft konzeptualisiert werde, greife sie am gleichen Körper an wie die beschleunigende Resultierende.

Da ... "Widerstand" noch die alte Bedeutung von etwas hat, was der Körper besitzt, was von ihm ausgeht und was der angreifenden Kraft Paroli bieten will, muß nun diese Trägheitskraft zwangsläufig als Kraftpfeil am gleichen Körper angreifend vorgestellt werden.
(Jung 1981a, 58)

Von 30 befragten Gymnasiasten (11. Klasse) kam keiner von selbst darauf, daß der "Widerstand" als Kraft angesehen werden muß, der an dem die Zugkraft ausübenden Körper angreift (vgl. Jung 1981a, 58).

ad 2:

Bei dieser Vorstellung liegt laut Jung eine Integration von Haftreibungsphänomenen in das Trägheitskonzept vor (vgl. Präkonzept 5, Punkt B.3.3.2.5).

Es kommt dazu, daß für viele Schüler Reibung mit Gewicht zusammenhängt. Wer also eine reine Reibungsvorstellung von Trägheit hat, wird glauben, im Zustand der Schwerelosigkeit seien alle Körper gleich träge, nämlich überhaupt nicht träge. Es gibt dann noch Mischvorstellungen.
(Jung 1981a, 14)

Trägheit werde in aller Regel im Kontext des In-Bewegung-Setzens verstanden, nicht im Sinne des In-Bewegung-Seins-und-Schneller-Werdens. Der Vorgang des Abstoppens werde ebenfalls selten mit Trägheit in Verbindung gebracht (vgl. Jung 1981a, 39f). In einem solchen Bild sei Trägheit eine Schwelle vor dem In-Bewegung-Setzen, für deren Überwindung eine Kraft einen "Schwellenwert" übersteigen müsse.

ad 3:

Die Vorstellung von Trägheit als Lahmheit im umgangssprachlichen Sinn von Schwerfälligkeit, Müdigkeit oder Schwunglosigkeit zeigte sich z.B. bei der hohen Zustimmung zu der Aussage "Durch mehr Energie kann die Trägheit herabgesetzt werden" (rund 70% in den 8. und 10. Klassen). In den Fällen, in denen die Schüler Trägheit als Beharrungsvermögen charakterisierten, war fast ausschließlich das Beharren im Zustand der Ruhe gemeint (vgl. Jung 1981a, 30).

ad 4:

Vorstellung 4 ist ein physikalisch akzeptabler Standpunkt. Trägheit ist danach ein qualitativer Begriff zur Beschreibung des Verharrungsvermögens von Körpern im eingenommenen Bewegungszustand (Trägheitssatz). Für Quantisierungen ist der Begriff der (trägen) Masse heranzuziehen.

In den schriftlichen Befragungen und Interviews zeigte sich jedoch, daß das Trägheitsverhalten bewegter Körper nicht verstanden wird - unabhängig davon, ob das Trägheitsprinzip formuliert werden konnte (vgl. Jung 1981a, 59f). Ein Körper, an dem keine resultierende Kraft mehr angreift, bleibt nach der Vorstellung der Schüler stehen oder wird immer langsamer (vgl. das Präkonzept 3-2, Punkt B.3.3.2.3). Die Schüler denken nach Jung in dem Zusammenhang "Kraft - Bewegung/keine Kraft - keine Bewegung" anstatt "Kraft - Beschleunigung/keine Kraft - keine Beschleunigung" (vgl. Jung 1981a, 60f).

Begriff "Kraft"

Hier wurden folgende Vorstellungen ermittelt:

- 1) aktive äußere Kräfte
- 2) Kraft als Potenz (man "hat" sie potentiell)
- 3) übertragbare Kraft (Kraftstoßfähigkeit)
- 4) Kraft als selbständige Entität, die "lauert" und Befehle ausführt

ad 1:

Vorstellung 1 beruht auf dem Schema der Aktivität (vgl. Denkrahmen 6, Punkt B.3.2.2.2). Entgegen der Newtonschen Gleichberechtigung von actio und reactio unterscheiden die Schüler zwischen den aktiven Ursachen einer Wechselwirkung und der passiven Reaktion, die "bloß" eine Wirkung sei. So meinten über ein Drittel der Zehntklässler, wenn ein Auto gegen einen parkenden Möbelwagen stoße, übe dieser keine Kraft auf das Auto aus, weil er sich ja nicht bewege (vgl. Jung 1981a, 75).

Das Aktivitätskriterium ist nach Jung eine bleibende Dominante für den Kraftbegriff (vgl. Präkonzept 4, Punkt B.3.3.2.4). Damit sei auch erklärbar, warum viele Schüler die Richtung der Reibungskraft zwischen einem Klotz und seiner Unterlage ausschließlich in Bewegungsrichtung sähen: der aktive, reibende Klotz übt die Kraft aus.

Der Schüler beachtet überhaupt nicht die Frage, ... ob am Klotz eine Reibungskraft angreift - er beschäftigt sich ausschließlich mit der Frage, ob der Klotz reibt! An eine andere Kraft kann er überhaupt nicht denken: Die Unterlage, die Fläche, ist ja unbeweglich und völlig passiv! (Jung 1981a, 91)

ad 2:

Nach Vorstellung 2 kann "man", bzw. ein Körper "Kraft haben", ohne sie aktuell auszuüben. Außer beim Stoß kommt diese Vorstellung in zwei weiteren Zusammenhängen vor: beim Magneten und bei der Gravitation (vgl. Jung 1981a, 79ff).

Die bewegten Körper haben Kraft ... und sie haben diese Kraft auch

dann, wenn sie sich nur bewegen. Sie üben sie aber aus, wenn sie in Wechselwirkung mit anderen Körpern treten, also stoßen (das Stoßen und das Kraftausüben werden selten unterschieden).
(Jung 1981a, 65)

Sehr eng ist nach Jung die Verbindung der Potenzvorstellung mit dem naiven Energiebegriff. Die Zustimmung zum Item "Energie ist die Kraft, die man aufwenden muß, um etwas zu machen" habe in den befragten 8. und 10. Klassen über 90% betragen. Eine absolute Gleichsetzung von Kraft und Energie könne man daraus jedoch nicht schließen.

Kraft ist ein polyvalenter Begriff, Energie ist eine, nur eine Bedeutung von Kraft. Historisch ist Kraft auch der übergeordnete Begriff gewesen. Bis weit ins 19. Jahrhundert hinein wurde in der Physik nur von "Kräften" geredet; vis viva war die kinetische Energie. Man sprach von den "Naturkräften" eher im Sinne von Energien als von Kräften im Newtonschen Sinn.
(Jung 1981a, 71)

Wir haben die "Polyvalenz" des Kraftbegriffs unter dem Präkonzept 3 "Kraft als universelle Wirkungsfähigkeit" (Punkt B.3.3.2.1) diskutiert. Die historische Genese des Kraft-Konzepts wird im Kapitel D dargestellt.

ad 3:

Jung stellte von der 7. bis zur 10. Klasse eine kontinuierliche Zunahme der Vorstellung fest, die Kraft, die auf einen Körper ausgeübt werde, gehe auf diesen über. Parallel dazu nehme die Vorstellung ab, die Kraft bleibe beim Ausüben. Der Abbau der Potenzvorstellung falle aber nicht mit dem Aufbau eines physikalisch korrekten Kraftbegriffs zusammen (vgl. Jung 1981a, 70f).

ad 4:

Hiernach werden Kräfte verselbständigt. So werde z.B. angenommen, in einem Magneten sitze eine Kraft. Jung führt Vorstellung 4 auf ein Grundbedürfnis vieler Schüler zurück, für Wirkungen (z.B. Anziehung eines Eisennagels) einen Verursacher, "Täter" zu identifizieren und sich nicht mit einer funktionalen Beschreibung zufriedenzugeben (vgl. Denkrahen 6; Punkt B.3.2.2.2).

Kräfte sind die verdinglichten Ursachen und die postulierten Täter. Man muß sie erfinden und verdinglichen, weil der Magnet selbst, der "Gegenstand", so sichtbar passiv herumliegt: Der ist sicher nicht der Täter!
(Jung 1981a, 85)

Zusammenhang von Kraft und Bewegung

Nach Jung ist das In-Bewegung-Setzen das reduzierte Kriterium für Kraft. Beschleunigung werde oft verstanden als "etwas auf Geschwindigkeit bringen" (Zweck der Kraftanwendung). Dabei stehe der Endzustand, die zu erreichende

bzw. erreichte Geschwindigkeit, im Vordergrund, nicht der Vorgang des Beschleunigens. Während das Schnellerwerden mit dem Wirken von Kräften in Zusammenhang gebracht werde, führten die Schüler für Verzögerungen "Widerstände" ins Feld. Kraft sei ebenso wie Bewegung stark dynamisch besetzt und eher an das Kraftgeben und damit Bewegunggeben geknüpft als an die Verminderung von Bewegung. Die Größe der Kraft korrespondiere mit der beabsichtigten Wirkung der Kraftanwendung, nämlich der Geschwindigkeit. Der Prozeß der Vermittlung bleibe unbeachtet. Dies erkläre, daß bei der Anwendung von Kraft ganz überwiegend nicht an bestimmte Zeitintervalle gedacht werde (vgl. Jung 1981a, 93ff).

Selbst Schüler der 11. Klasse erwähnen das Zeitintervall nicht, während dessen die Kraft "wirkt". Die Bedeutung des Produkts Kraft mal Zeit ist ihnen völlig fremd. Zeitbegriffe haben sie natürlich, und auch den Zeitbezug. Der wird allerdings vorwiegend über Formeln wie $s = (1/2) a t^2$ oder $v = a t$ hergestellt, in denen die Zeit nicht als Intervall vorkommt. Daß man zur Berechnung von v oder a ein Zeitintervall braucht, ist eine Rechengeschichte.
(Jung 1981a, 95f)

Wir verweisen bezüglich des letzten Punkts auf unsere Ausführungen zu Denkrahmen 8 "Formelfixierung" (B.3.2.2.4).

Begriffe "Momentangeschwindigkeit" und "Beschleunigung"

Der Geschwindigkeitsbegriff ist häufig auf den Betrag reduziert. 3 von 12 interviewten leistungsstarken Leistungsschülern "äußerten explizit, daß jede Bewegung mit $v = \text{const.}$ unbeschleunigt sei, also auch die Kreisbewegung" (Jung 1981a, 177). Beschleunigen wird, wie eben schon dargestellt, verstanden als In-Bewegung-Setzen. In einer ausführlichen Fallstudie Jungs nimmt ein Schüler an, im Umkehrpunkt der Bahn eines nach oben geworfenen Körpers sei die Beschleunigung Null. Der Körper stehe dabei einen Augenblick still (Schüler: "Ein Augenblick ist auch Zeit").

Bei ihm liegt ein deutlicher Hinweis vor auf ein Mißverständnis der Vorstellung von Zeitpunkt, das mit mangelndem Verständnis der idealisierten mathematischen Welt zusammenhängt, die eine andere Struktur hat wie die Alltagswelt mit ihren überlappenden Episoden.
(Jung 1981a, 114)

Des weiteren sieht der Schüler im Umkehrpunkt einen Übergang von einer gebremsten zu einer beschleunigten Bewegung. Im Umkehrpunkt sei der Körper weder beschleunigt noch verzögert: Beschleunigung gleich Null. Diese Schilderung deckt sich mit Darstellungen von Trowbridge/McDermott (1980, 1024) und Arons (1981, 176f) und Erfahrungen, die wir unter Punkt B.3.3.1.2 schildern (Präkonzept 2 "Geschwindigkeit als Schnelligkeit").

Anfahr- und Bremsvorgang

Bei einer Befragung leistungsstarker Oberstufenschüler wurde die Fähigkeit zur qualitativen Konzeptualisierung von Alltagsphänomenen getestet.

Sehen die Schüler, daß zum Anfahren eine nach vorn gerichtet Resultierende nötig ist, wo lassen sie diese angreifen, und sehen sie, daß diese die Reibungskraft der Straße auf das Auto ist?
(Jung 1981a, 167)

Resultat: Kein Schüler gab eine richtige Lösung an.

Die Mehrzahl der Schüler lehnt explizit die angebotene Lösung, daß die Straße die beschleunigende Kraft auf das Auto ausübe, entschieden ab. (...) Sie paßt nicht in das Schema, daß nur ein aktiver Körper auf einen anderen eine Kraft ausüben könne.
(Jung 1981a, 172)

Der Hinweis auf actio gleich reactio konnte den Schülern keine Hilfestellung geben, da dieses Konzept von allen falsch verstanden wurde. Nach den Schülervorstellungen greifen actio und reactio am gleichen Körper an.

Das Verharren der Schüler bei der "Motorkraft" deutet für uns auf ein Interesse der Schüler an praktischen Erklärungen, an technisch relevanten Faktoren (vgl. Allgemeines Interesse 3 an "praktisch-technischen Fragestellungen"; B.3.2.3.2). In einer solchen Sichtweise können actio (Kraft Auto auf Straße) und reactio (Kraft Straße auf Auto) nicht wie im Newtonschen System gleichberechtigt sein. Die Frage nach dem "Verursacher" bekommt einen anderen Sinn als in einer relationalen physikalischen Betrachtung: Ohne das Laufen des Motors würde die Straße das Auto nie beschleunigen. Die physikalische Prinziperklärung erscheint weniger wichtig als das Eingehen auf technische Details (Motor, Getriebe, "Kraft"-Übertragung).

Dies zeigte sich bei Jung auch bezüglich des Abbremsvorgangs.

Obwohl jedem Schüler eine korrekte physikalische Beschreibung des Anfahrvorgangs angeboten worden ist, gelingt eine Übertragung auf den Bremsvorgang niemanden. Die Schüler bleiben auf der konkretistischen Stufe - die Bremsbacken hemmen die Rotation der Bremsscheibe durch Reibung - stecken. Auch mit Hilfe können sie aus der inneren Kraft auf die Scheibe keine äußere Kraft auf das Auto konstruieren.
(Jung 1981a, 174)

Es bleibt zu fragen: Liegt das allein an fehlenden Kenntnissen oder nicht auch daran, daß die Schüler den Sinn einer solchen Konstruktion nicht sehen? Die newtonsche Vorgehensweise, bei der die resultierende Kraft auf das Auto aus der Beschleunigung ermittelt werden kann, führt schneller und leichter zu einem Ziel als der Ansatz über die komplexen technischen Systeme. Aber letzterer

ist von größerer praktischer Relevanz. Das Interesse an praktisch-technischen Fragestellungen (Vorverständniselement A13) steuert die Denkrichtung der Schüler in den Beispielen der Anfahr- und Bremsvorgänge mit.

Kreisbewegung

In ausführlich wiedergegebenen Interviewpassagen dokumentiert Jung die großen Schwierigkeiten, die Schüler mit der Beschreibung von Kreisbewegungen, speziell mit der Fliehkraft haben. Die Zentrifugalkraft wird unabhängig vom Bezugssystem stets als vorhanden vorausgesetzt und an erster Stelle genannt (vgl. Präkonzept 6).

Der Körper "will" nicht zur Mitte hin. Damit er von der geradlinigen Bahn abweicht, braucht man eine zur Mitte hin gerichtete Kraft. (...) Das Nicht-Wollen der "Masse" wird als "Widerstand" gesehen, und dieser Widerstand ist die Zentrifugalkraft. (...) (Der Widerstand) ist eine Art Kraft, die (der Körper) hat und die nicht mehr relational als Kraft-von-auf gesehen wird. (...) Es bleibt dann keine andere Wahl, als sie durch einen der Zentripetalkraft entgegengerichteten Pfeil am gleichen Körper zu symbolisieren.
(Jung 1981a, 134f)

Oftmals werde die Kreisbewegung nicht als beschleunigte Bewegung konzeptualisiert. Dadurch entfalle die Notwendigkeit, eine zum Kreismittelpunkt gerichtete Kraft anzunehmen. Falls eine Zentripetalkraft als notwendig erachtet werde, kombinierten die Schüler diese z.T. in der Weise mit der Fliehkraft, daß sie sagen, die Zentrifugalkraft müsse etwas kleiner sein als die Kraft nach innen. Die Zentripetalbeschleunigung bereite weitere Schwierigkeiten: Wie kann ein Körper, der nach innen beschleunigt wird, seinen Bahndurchmesser beibehalten? (Vgl. Jung 1981a, 158)

Übergeordnete Erklärungsmuster für das Schülerverhalten

Aus den mittels Fragebögen und Interviews erhobenen Präkonzepten und Lernschwierigkeiten arbeitet Jung eine Reihe übergeordneter Erklärungsmuster heraus, die die bereichsspezifischen Vorstellungen der Schüler auf allgemeinere Denkstrukturen zurückführen (Jung 1981a, 19ff). Es werden unterschieden:

- grundlegende "kognitive Organisationsformen" und
- inhaltliche "spezielle Organisatoren".

Zu den kognitiven Organisationsformen zählt Jung 1. die episodische Organisation der Erfahrung, die zu unterscheiden sei von einer begrifflichen Organisation.

Letzteres bedeutet, daß Erfahrung unter allgemeine Begriffe subsumiert wird. Bei der episodischen Organisation bleibt der Organisator auf der-

selben Ebene, Subsumtion findet nicht statt. Der Organisator ist ein eindrucksvolles oder vertrautes Ereignis, eine Episode, die etwas bedeutet, also auch affektive Besetzungen hat.
(Jung 1981a, 20)

Bremsen und Starten seien für Schüler ganz verschiedene Episoden. Sie bedeuteten ganz Verschiedenes und seien mit unterschiedlichen Absichten und Handlungen verbunden. Dies mache verständlich, daß keine Einordnung unter einen allgemeinen Begriff "Bewegungsänderung" erfolge.

2. Dominanz perzeptiver Muster

Diese Organisationsform zeige sich z.B. in der Vorstellung, man könne zwei Körpern ansehen, welcher von ihnen träger sei. Die äußere Erscheinungsform eines Phänomens (z.B. Schräglage eines Motorrades bei der Kurvenfahrt) führe die Denk- und Argumentationsrichtung weg von logischen Algorithmen und hin zu scheinbar naheliegenden face-value Aspekten (z.B. das Kippen des Krades auf die am Schwerpunkt angreifende Gewichtskraft zurückzuführen). Jung nennt das "perzeptive Verführung" (vgl. Jung 1981a, 145).

3. Kontextveränderung - Kontextergänzung

Die Schüler nehmen ein Item nicht in seiner gemeinten Allgemeinheit, sondern ergänzen es vor der Beantwortung mit speziellen Situationen, die meist einschränkender Natur sind.
(Jung 1981a, 21)

So erklärt Jung, daß inhaltlich gleiche Aufgaben in unterschiedlichen Formulierungen von Schülern unterschiedlich beantwortet werden: Die Items werden in verschiedene, mit anderen Einschränkungen versehene und anders ergänzte Episoden eingebettet.

Kontextveränderung ist nur ein Ausschnitt aus dem Prozeß der Verarbeitung angebotener Lerninhalte beim Schüler. Des weiteren nennt Jung:

- Einordnung in einen Orientierungsrahmen (Lebenswelt, Technik, Physik)
- Reduktion der bei der Analyse eines Sachverhalts zu berücksichtigenden Parameter
- Austausch von Informationen oder Variablen

(vgl. Jung 1983)

Als spezielle Organisatoren nennt Jung 1. Intention (vgl. Denkraum 7 "Zweckdenken"). Damit gemeint ist die Betrachtung physikalischer Sachverhalte unter dem Aspekt der mit dem Vorgang verbundenen Absichten, die dann zu den das Denken leitenden Kategorien werden: Kräfte "wollen" beschleunigen, Körper "wehren" sich dagegen. Dazu gehöre auch die Vorstellung, man könne eine in Bewegung befindliche Kugel genau in die Richtung stoßen, in der man den Stoß

ausführt, weil man das ja so will (vgl. Jung 1981a, 110).

(Die Schüler) lernen nicht den Unterschied zwischen verschiedenen Begriffssystemen, z.B. einem juristisch-moralischen, in dem Intention sehr wohl eine Rolle spielt, und einem physikalischen, in dem es keine spielen sollte.

(Jung 1981a, 23)

2. Aktivität und Ursache

Hierzu zählt nach Jung besonders die Vorstellung, nur aktive Körper könnten wirkliche Kräfte ausüben, passive Körper leisteten Widerstand, der nicht als reale Kraft konzeptualisiert werde. Der Organisator "Ursache" leite stark die Fragerichtung der Schüler. (Wir haben den entsprechenden Denkrahm 6 "Verursacher-Fixierung/Aktivitätsdenken" genannt.)

Für die mechanische Einwirkung ist nicht weiter wichtig, wodurch sie ausgelöst wird; häufig wird alle Denkenergie auf diese weitergehende Frage verwendet, weil kausal und nicht funktional gedacht wird. (...) Ein Hauptproblem scheint zu sein, daß der Lerner sich nicht entschließen kann, bescheidene Fragen zu stellen, weil habituell sein Interesse Fragen der Verursachung und der Schuldzuschreibung gilt.

(Jung 1981a, 131)

3. Überwindungsvorstellung

Überwindungsvorstellungen treten auf als Schwellenvorstellung:

Wenn die Kraft, die den Körper in Bewegung setzen soll, nicht groß genug ist, bewegt er sich nicht. Die Schüler können das typischerweise nicht in die physikalische Aussage übersetzen, es greife eine entgegengesetzt gleiche, weitere Kraft an. Das Phänomen der Schwelle ist selbst die ausreichende Erklärung.

(Jung 1981a, 25)

oder als Gewinnvorstellung: Kräfte addieren sich nicht, sondern überwinden sich.

Wenn die Kraft genügend groß ist, wird die Trägheit "überwunden", wobei gleichzeitig geäußert wird, sie sei keineswegs nicht mehr da; sie kann sogar wieder die Oberhand gewinnen: Dann kommt der Körper wieder zur Ruhe.

(Jung 1981a, 26)

Die Herausarbeitung von Denkstrukturen auf höherer Ebene bietet nach Jungs Überzeugung einen Ansatzpunkt, um der Vielzahl der einzelnen physikalisch falschen Präkonzepte gleichsam "global" den Boden zu entziehen.

Ich (gehe) davon aus, daß von der kategorialen Ebene aus die spezifischen Vorstellungen am wirksamsten aufgebrochen werden können.

(Jung 1978, 127)

Diese Annahme korrespondiert mit unserer Schwerpunktsetzung auf die Erforschung themenübergreifender Denkrahm, einschließlich wissenschaftstheoretischer Elemente, sowie allgemeiner Interessen.

C.3

Tabellarischer Überblick über die Kernaussagen
der referierten Studien

A u t o r	D y n a m i k Kraftbegriff Kraft und Bewegung	K i n e m a t i k Geschwindigkeit Beschleunigung	Allgemeine Merkmale der Schülertheorien	Didaktisch- methodische Konsequenzen	sonstiges
Arons 1981 (College)	Nur belebte Körper können eine Kraft ausüben ("vitalistische Vorstellung"). In Richtung der Bewegung wirkt immer eine Kraft. Das 3. Axiom wird völlig falsch verstanden: Actio und reactio greifen am gleichen Körper an.	Schwierigkeiten bei der Unterscheidung zwischen Zeitraum und Zeitpunkt. Daraus resultieren Probleme mit dem Begriff der <u>Momentangeschwindigkeit</u> . Ein nach oben geworfener Körper bleibt im Umkehrpunkt einen "Moment" stehen.	Kraftvorstellungen erinnern an die Impetustheorie.	Das kompakte Vortragen der Newton'schen Theorie ist als Lehrweise "gescheitert". Schüler müssen Gelegenheit haben, ihre Gedankengänge zu artikulieren.	Geringe Korrelation zwischen der Fähigkeit zur rechnerischen Anwendung von $F = m \cdot a$ und dem Vermögen, korrekte Kraftformeln (Kraftpfeile) zu zeichnen.
Trowbridge 1980/81 (College)	Geschwindigkeit ist ein Zusammenhang von Zeit und Weg (1h für 1km), keine eigenständige Verhältnissgröße. Beim Vergleich der Geschwindigkeiten zweier Körper wird die relative Position als Kriterium herangezogen. Zuordnung einer <u>Momentangeschwindigkeit</u> zu einem Zeitpunkt ist große begriffliche Hürde: Zu einem Zeitpunkt haben Körper keine Geschwindigkeit; sie haben nur einen Ort. Bei Beschleunigung besteht kein qualitatives Verständnis der Verhältnissgröße $\Delta v / \Delta t$. (Bei $v = 0 : a = 0$) Berechnung von Beschleunigungswerten mittels $a = \frac{ds}{dt} / \frac{dt}{dt}$ Als Kriterium für Beschleunigungsvergleiche werden die Endgeschwindigkeiten herangezogen.	Die Schüler vorstellungen sind sehr resistent gegen Veränderungen durch Unterricht.	Typische Fehlvorstellungen müssen im Unterricht direkt angesprochen werden. Mehr Zeit für grundlegende kinematische Begriffe, denn schon vor Einführung des Vektoraspekts bestehen große Verständnisschwierigkeiten bei den kinematischen Begriffen.	Keine durchgehende Übereinstimmung zwischen formalen Fähigkeiten in konventionellen Tests und echter physikalischer Konzeptualisierungsfähigkeit.	
Jung 1981a (8. bis 13. Klasse)	Nur aktive Körper können "richtige" Kräfte ausüben. Dem stehen passive Widerstände von Körpern entgegen, auf die Kräfte einwirken. Körper (besonders bewegte) können "Kraft haben", ohne sie auszuüben (Vermischung mit Energie). Die Größe der Kraft korrespondiert mit der erreichten Endgeschwindigkeit, nicht mit dem Beschleunigungsvorgang. Kraft ausüben heißt "In-Bewegung-Setzen". Das Zeitintervall des Kraftausübens bleibt unbeachtet. Verdinglichung von Kraft als selbständige Entität, die in Körpern sitzt. Actio und reactio greifen am gleichen Körper an. Die Zentrifugalkraft wirkt unabhängig vom Bezugssystem immer.	<u>Beschleunigen</u> heißt In-Bewegung-Setzen. Ein nach oben geworfener Stein steht im Umkehrpunkt einen Augenblick still. <u>Geschwindigkeit</u> wird auf den Betrag (Tempo) reduziert. Eine Kreisbewegung ist unbeschleunigt. Kein Verständnis von <u>Momentangeschwindigkeit</u> zu einem Zeitpunkt.	Schüler fragen nach den "Ursachen" eines Phänomens und geben sich nicht mit funktionalen Beschreibungen zufrieden. Das Denken der Schüler ist nicht nach Begriffen, sondern nach <u>Episoden</u> geordnet.	Die speziellen Fehlvorstellungen können am effektivsten von der Ebene der Denkkategorien her aufgebrochen werden (Bsp.: funktionales Denken, Denken in Relationen statt in Eigenschaften). Keine Aktivierung von Schüler vorstellungen bevor das physikalische System vermittelt ist; sonst ist ein Abbau falscher Vorstellungen schwierig. Vorschlag für eine Behandlung der Mechanik, die eine Aktivierung falscher Vorstellungen vermeidet.	<u>Trägheit</u> ist die überwindende "Lahmheit" eines Körpers. Vermischung von Trägheits- und Haftreibungsphänomenen.
Watts 1983 (11 bis 18 Jahre)	- Vermischung von Kraft und Energie - Nur aktive Körper können Kraft ausüben - An einem bewegten Körper wirkt eine Kraft in Bewegungsrichtung. Bewegung ist eine Kraft.				

Dynamik	Kinematik	Allgemeine Merkmale der Schülertheorien	Didaktisch- methodische Konsequenzen	sonstiges
Kraftbegriff Kraft und Bewegung	Geschwindigkeit Beschleunigung			
Je nach Situation aktivieren die Schüler 3 verschiedene Vorstell.:		Nähe zur Impetus- theorie. Das "intui- tive Denken" hat sich im Alltag be- währt und ist keineswegs "primiti- v".	Intuitive Schemata müssen themati- siert werden.	
1. $F = m \cdot v$: Kraft des Körpers in Bewegungsrichtung, wenn diese vorgegeben ist			Die Schüler müssen sich ihres intuitiven Denkens bewusst werden.	
2. $F = m \cdot a$: Bei Zusammenfal- len von Kraft- und Beweg.rich- tung, bzw. in Rechenaufgaben		Unterschiedliche Konzepte werden mit gleichen Worten belegt: Kraft ist ein "undifferentiated explanatory com- plex".		
3. Trägheitskräfte : Bei Kreis- bewegungen.				
Actio und reactio greifen am gleichen Körper an. Falls eine Be- wegung zustandekommen soll, muß actio größer sein als reactio.				
Bei Kreisbewegungen wird die Zentrifugalkraft unabhängig vom Bezugssystem als wirkend angeno- mmen.				
Die fundamentale Aussage des 1. Axioms über den Zusammenhang von Kraft und Beschleunigung wird von den Schülern (und selbst von manchen Lehrbuchautoren) unbe- wußt zugunsten der Vorstellung abgelehnt, daß Kraft <u>Bewegung</u> bewirkt.	Geschwindigkeits- und Beschleuni- gungsbegriff wer- den auf ihre Beträge reduziert.		Vorschläge zur Verbesserung der Einführungsweisen der Begriffe. Warren kritisiert mißver- ständliche Lehr- buchdarstellungen.	Die Fähigkeit zur Errechnung numeri- scher korrekter Lösungen in Stan- dardaufgaben erfor- dert kein wirkliches Begriffsverständnis.
Das 3. Axiom wird von kaum einem Schüler richtig verstanden: Actio und reactio greifen am selben Körper an; Wechselwir- kungs- und Gleichgewichtskräfte werden vermischt.			Physikalische Situa- tionen dürfen nicht nur als <u>Rechenan- lässe</u> behandelt werden. Plädoyer für mehr begriff- lich/qualitative Behandlungsweisen.	
Gleichförmige Kreisbewegung bleibt weitgehend unverstanden (nur 1/4 der Schüler zeichnen die Resultierende radial nach innen).				
Keine klare Trennung zwischen Einzelkräften und der Resul- tierenden.				
Persistenz des Konzepts "Kraft haben" bis in die Oberstufe. Daneben ansteigender Gebrauch von "Kräfte wirken" (auch ohne Physikunterricht).		Keine grundsätz- lichen Verschie- bungen von einem intuitiven zu einem physikal. Kraft- verständnis bis in die Oberstufe.		
Grundsätzliche Schülervorstellung: v prop. F		Die Schülertheorien sind vergleichbar denen von Aristot- eles, Galilei oder der Impetustheorie. Die Theorien sind dem Alltag gut angepaßt. Sie sind sehr flexi- bel. Sie können Elemente der Newton'schen The- orie aufnehmen, ohne sich in ihrer Grundstruktur zu verändern.	Das Umdenken von den Alltags- theorien zum New- ton'schen System entspricht einem Paradigmawechsel. Das "elegante" Leh- ren der klassischen Mechanik hat sich als ineffektiv erwie- sen. Schülervorstell- ungen und wissen- schaftliche müssen explizit <u>gegenüber- gestellt</u> werden.	"Gute" Schüler unterscheiden sich von "schlechten" u.a. dadurch, daß sie zwischen unmittel- barer Beobachtung und physikalischer Beschreibung von Phänomenen <u>bewußt</u> trennen.

A u t o r	D y n a m i k Kraftbegriff Kraft und Bewegung	K i n e m a t i k Geschwindigkeit Beschleunigung	Allgemeine Merkmale der Schülertheorien	Didaktisch- methodische Konsequenzen	sonstiges
Mc Closkey 1983 (High School, College)	Vom Bewegter wird auf den bewegten Körper Kraft übertragen.	Nach Schülervorstellungen bewegen sich Körper z.T. anders als in der Realität. Beispiel: Kreisbahn als Erhaltungsgröße auch nach Wegfall der Zentralkraft.	Nähe zur Impetustheorie (z.T. wörtliche Übereinstimmung mit historischen Texten). "Kreissimpetus"	Schüler verarbeiten den Lehrstoff auf der Grundlage einer intuitiven Impetustheorie. Die Schüler müssen ausdrücklich nach ihren intuitiven Vorstellungen gefragt und diese der Newton'schen Mechanik gegenübergestellt werden.	Besonderheit d. Arbeit von Mc C. Schüler <u>handelt</u> z.T. nach falschen Annahmen über das Verhalten realer Körper. Möglicher Grund: Optische Täuschungen in mitbewegten Bezugssystemen.
Clement 1982 (College)	Bewegung beinhaltet Kraft ("motion implies force"). 1. Zur Aufrechterhaltung einer Bewegung ist eine Kraft in Bewegungsrichtung erforderlich ("erfundene Kraft" des Körpers). 2. Bei Bewegungen, die gegen eine Bremskraft fortschreiten, ist die "erfundene Kraft" größer als die Bremskraft. 3. Schnelligkeitsänderungen kommen zustande, weil die Kraft des Körpers sich aufbaut oder abstirbt.		Große Nähe der Schüleraussagen zu Bewegungen zu Galilei. Die Schülertheorie ist eine auf Erfahrungen basierende, plausible Theorie. Das Umdenken zur Newton'schen Sicht ist wie in der Physikgeschichte eine große begriffliche Hürde.	Die Schüler müssen sich ihrer qualitativen Fehlvorstellungen bewußt werden und sie aussprechen. Clement empfiehlt Galileis Dialogmethode als Modell für den Unterricht.	Qualitative Fehlvorstellungen sind z.T. unter formalen Fähigkeiten versteckt.
Whitaker 1983 (College)	Zur Aufrechterhaltung einer Bewegung ist eine Kraft erforderlich. Bei Wegfall der Kraft kommt die Bewegung bald zum Stillstand	Freier Fall in einem sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit mitbewegenden Bezugssystem: Der fallende Körper bleibt zurück.	Große Nähe zu Aristotelischen Vorstellungen.	Die Schüler müssen sich ihrer Sichtweise bewußt werden, bevor die Newton'sche Sichtweise behandelt wird.	Schüler berücksichtigen bei Aufgabenlösungen häufig Reibungswiderstände, auch wenn im Aufgabentext davon nichts die Rede war.
Schenk 1983 (SII)	Rund die Hälfte der untersuchten Schüler vermeidet jegliche mechanische Konzeptualisierung, bzw. hält konsequent an den Alltagstheorien fest: - Die Aufrechterhaltung einer Bewegung oder unnatürlichen Lage erfordert Kraft/Energie. - Eine Bewegung hat Kraft. Nur wenige Schüler erreichen ein Konzeptualisierungsniveau, auf dem sie eindimensionale Bewegungen unter dem Einfluß konstanter Kräfte korrekt beschreiben können.	Geschwindigkeit impliziert Schwung oder Kraft. Bewegung und bewegte Masse werden nicht getrennt.	Schülertheorien sind im Alltag bewährt. Im Vergleich zu physikalischen Theorien ist ihr Anwendungsbereich jeweils sehr begrenzt.		Zwischen dem Formalisierungsniveau (Formelkenntnis, Rechenfertigkeit) und dem Konzeptualisierungsniveau (Begriffsverständnis) bestehen Diskrepanzen.

C.4

Einordnung der eigenen Arbeiten
in den internationalen Forschungsstand

C.4.1

Generelle Einschätzung

Die zur Kennzeichnung des Forschungsstands referierten Untersuchungen sind in ihrer Anlage recht heterogen. Manche beschränken sich auf die Beschreibung einzelner Lernschwierigkeiten (z.B. Arons 1981), andere bringen Detailstudien zu ausgewählten Begriffen (z.B. Trowbridge 1980) bis hin zu einer Gesamtsicht der Schülervorstellungen zur Newtonschen Dynamik mit Aufschlüssen über die Tiefenstruktur kognitiver Prozesse (Jung 1981a).

Bei aller Verschiedenheit der Forschungsmethoden und der Populationen ist festzustellen, daß die in mehreren Ländern (Belgien, Bundesrepublik, Frankreich, Großbritannien, USA) mit unterschiedlichen Bildungssystemen durchgeführten Untersuchungen zu konvergenten bis deckungsgleichen Ergebnissen kommen. Es ist daher nicht überraschend, daß sich im Bereich der Präkonzepte, auf die sich die Studien konzentrieren, unsere Arbeiten nahtlos einfügen. Sie stellen in diesem Bereich (Vorverständniskomponente II) eine Absicherung, Erhärtung und in Teilen eine Nuancierung des Erkenntnisstandes dar.

Im Bereich der allgemeinen Komponenten (Denkrahmen und allgemeine Interessen) ist das Schülervorverständnis zur Mechanik weit weniger erforscht als bei den spezifischen Präkonzepten. Hier erweitern unsere Arbeiten den Kenntnisstand wesentlich. Das gilt insbesondere für diejenigen Denkrahmen, die wissenschaftstheoretische Aspekte der Zugriffsweisen von Schülern auf mechanische Phänomene klären, sowie für die Einbeziehung von Interessen in das Vorverständnis.

Mit der Verzahnung von klassisch empirischen Testverfahren und der Interpretation von Unterrichtsprotokollen wird von uns eine Methode eingeführt, die es erlaubt, die praktische Relevanz der Ergebnisse für den Forschungsgegenstand der Fachdidaktik, nämlich den Physikunterricht, unmittelbar einsichtig zu machen.

C.4.2

Präkonzepte

Bereich Kinematik

Bei den Präkonzepten zu Geschwindigkeit und Beschleunigung besteht nahezu Deckungsgleichheit unserer Ergebnisse mit den Arbeiten von Arons (1981), Jung (1981a) und Trowbridge (1980/81) über alternative Konzeptualisierungen.

Geschwindigkeit wird auf "Schnelligkeit" (Betrag) reduziert. Kreisbewegungen werden als unbeschleunigt angesehen. Aber auch der eindimensionale Geschwindigkeitsbegriff bereitet Probleme. Die Momentangeschwindigkeit wird nicht als

Verhältniszahl $\Delta s/\Delta t$ einem Zeitpunkt zugeordnet, sondern einem endlichen, wenn auch sehr kleinen Zeitraum: Zu einem Zeitpunkt hat ein Körper keine Geschwindigkeit, sondern nur einen Ort. Ein nach oben geworfener Stein steht im Umkehrpunkt seiner Bahn einen Augenblick ("Moment") still.

Beschleunigung wird verstanden als Änderung des Geschwindigkeitsbetrages, bzw. als das In-Bewegung-Setzen aus dem Zustand der Ruhe (Jung 1981a). Kriterium für die Größe der Beschleunigung ist die erreichte Endgeschwindigkeit. Das qualitative Verständnis von (eindimensionaler) Beschleunigung als eigenständige Verhältnisgröße v/t bereitet Schwierigkeiten.

Zusätzlich haben wir als Bestandteil des Präkonzepts zum Beschleunigungsbegriff gefunden, daß ein Teil der Schüler davon ausgeht, ein Körper beschleunige nach einem Anstoß noch eine Zeit lang aus sich heraus weiter (Vorstellung eines "Beschleunigungsvorrats").

Bereich Dynamik

Alle Arbeiten zum Kraftbegriff belegen, daß Schüler eher einen Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung als zwischen Kraft und Bewegungsänderung sehen: Zum Aufrechterhalten einer Bewegung ist eine (resultierende) Kraft in Bewegungsrichtung erforderlich. Gleichzeitig "hat" ein bewegter bzw. "sich bewegend" Körper eine Kraft. Aber auch die Verbindung von Kraft und Beschleunigung besteht als Facette des Clusterbegriffs 'Kraft'. Viennot fand, daß diese Verbindung besonders dann aktiviert wird, wenn in einer Problemsituation die Bahnkurve nicht vorgegeben ist. Jung stellte fest, daß in den Vorstellungen der Schüler die Größe der Kraft mit der Endgeschwindigkeit korrespondiert, nicht mit dem Beschleunigungsvorgang (Nichtbeachtung des Zeitraums der Kraftwirkung).

Das dritte Newtonsche Axiom wird grundlegend falsch verstanden (Warren 1979). Für die meisten Schüler greifen actio und reactio am gleichen Körper an. Für das Zustandekommen einer Bewegung muß actio größer sein als reactio (Viennot 1979). Diesem "Kraftwettstreit" entspricht die Vorstellung, ein Körper bewege sich nur dann, wenn seine gespeicherte Kraft größer sei als eine wirkende Bremskraft (Clement 1982).

Wir konnten diese Feststellungen an Beispielen aus Unterrichtsprotokollen und Tests weiter erhärten (Präkonzepte 3-1, 3-2, 3-3). Zur Kopplung von Trägheit, Gewicht und Reibung (Präkonzept 5; B.3.3.2.6) haben wir sonst nur bei Jung (1981a, 14) Hinweise gefunden.

Ein zentrales Vorverständniselement ist die Sichtweise von Kraft als "allgemeine

Wirkungsfähigkeit" (Clusterbegriff 'Kraft'; siehe B.3.3.2.1). Der Sachverhalt einer Vermengung von Kraft und Energie in den Vorstellungen der Schüler ist an sich schon länger bekannt. Wir haben das Präkonzept genauer herausgearbeitet, weil sich aus ihm heraus viele Facetten des Erklärungsschemas Kraft/Energie bei mechanischen Phänomenen verstehen lassen. Das gilt z.B. für die Übertragbarkeit von Kraft und die gegenseitige Umwandelbarkeit von Kraft und Energie. Ebenso erklärt sich daraus, daß Kraft und Energie als physikalische Begriffe nicht isoliert und nacheinander gebildet werden (können), sondern nur in einem Prozeß gegenseitiger Abgrenzung. In ähnlicher Intensität hat sich Walter Jung diesem Thema zugewendet. Er spricht von Kraft als einem "polyvalenten Begriff" (1981a, 71). In anderen Arbeiten wird darauf mehr beiläufig verwiesen. Warren (1979, 34) berichtet, er habe aus Interviews den Eindruck gewonnen, daß "einige Schüler" Impuls, Energie und Trägheit im Grunde als dasselbe betrachteten. Viennot vermerkt in einer Fußnote, daß Schüler Kraft und Energie zu einem "single and undifferentiated explanatory complex" vermischen (1979, 208). Sie schreibt an anderer Stelle (S. 210), Schüler bezeichneten unterschiedliche Vorstellungen ("notions") mit gleichen Namen ("Kraft"/"Energie"). Diese Einschätzung ergibt sich u.E. nur aus dem Vorverständnis eines Physikers. Er erkennt hinter den Verwendungen von "Kraft" in verschiedenen Erklärungszusammenhängen unterschiedliche Konzepte, die man physikalisch mit Impuls, kinetischer Energie usw. kennzeichnet. Wir meinen, daß für die Schüler die Gemeinsamkeiten der "Kräfte" in den verschiedenen Verwendungszusammenhängen überwiegen, die im Clusterbegriff 'Kraft' zusammenlaufen. Wenn Schüler zwischen Kraft, Energie, Impuls differenzieren, verstehen sie darunter meist verschiedene Erscheinungsformen von etwas prinzipiell Gleichem.

Die Verfasser der zitierten Studien stellen einhellig die Nähe der Schülervorstellungen zu Aristoteles, Galilei oder den Impetustheorien fest, bis hin zu wörtlichen Übereinstimmungen. Clement (1982) und Champagne (1980) sehen im erforderlichen Umdenken zur Newtonschen Dynamik eine Rekonzeptualisierung, die vergleichbar sei mit dem langwierigen geschichtlichen Umdenkungsprozeß. Daher seien die Lernschwierigkeiten der Schüler nicht verwunderlich, sondern geradezu zwangsläufig.

Wir gehen den geschichtlichen Parallelen im Kapitel D der vorliegenden Arbeit nach. Zusätzlich zu den spezifischen Rekonzeptualisierungen betrachten wir die generellen Aspekte des Wandels in der Zugriffsweise auf Wirklichkeit, die den Übergang von der aristotelischen zur galileischen-newtonschen Physik kennzeichnen und die mit allgemeinen Elementen des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik korrespondieren (Komponente I).

C.4.3

Denkrahen

Denkrahen spielen in den vorliegenden Untersuchungen über das Schülervorverständnis zur Mechanik eine untergeordnete Rolle. Im Vordergrund stehen begriffsspezifische Präkonzepte ("misconceptions"). Nur Jung widmet sich eingehend den, wie er es nennt, "allgemeinen Einflußfaktoren" in Form von "kognitiven Organisationsformen" und "speziellen Organisatoren". Damit wird der Bereich 2 "Problemlösungsverhalten/Denkstrategien" der Vorverständniskomponente I angesprochen.

Jung spricht bei den grundlegenden kognitiven Organisationsformen zunächst von der "episodischen Organisation der Erfahrung". Der damit zum Ausdruck gebrachte Gegensatz zur begrifflichen Organisation der Erfahrung korrespondiert mit dem von uns formulierten allgemeinen Interesse 3, nach dem Schüler sich mehr für praktisch-technische Fragestellungen interessieren als für die prinzipielle Strukturierung von Phänomenen durch Einordnung in theoretisch-begriffliche Erklärungsrahmen, sowie dem Denkrahen 9, nach dem Schüler versuchen, gestellte Probleme dadurch zu lösen, daß sie sie auf vermeintlich äquivalente Fälle mit bekannten Lösungen (vertraute Episoden) abbilden. Zu den kognitiven Organisationsformen "Dominanz perzeptiver Muster" und "Kontextveränderung/Kontextergänzung" können wir keine vergleichbaren Vorverständniselemente anführen.

Direkte Übereinstimmung besteht bei zwei speziellen Organisatoren:

- Intention → Zweckdenken (D7)
- Aktivität und Ursache → Verursacherfixierung/Aktivitätsdenken (D6)

Das Jungsche Element der "Überwindungsvorstellungen" haben wir nicht als Denkrahen formuliert.

Bei Viennot finden sich Ausführungen zum Eigenschaftsdenken (D5) und zu Ursprungseinbeziehung/globales Denken (D10), die mit unseren Ergebnissen übereinstimmen.

Neu ist die Einbeziehung wissenschaftstheoretischer Aspekte in das thematische Vorverständnis zur Mechanik. Zur wissenschaftstheoretischen Analyse der spezifischen Erkenntnisweise der modernen Physik liegen Arbeiten u.a. von Künzli (1982), Redeker (1983), Böhme (1981) und Gleich (1984) vor. Die Analyse wurde bisher mehr global formuliert. Wir konnten die spezifische Bedeutung wissenschaftstheoretischer Überlegungen für Lernprozesse in der Mechanik empirisch nachweisen. Damit lassen sich Ergebnisse anderer Untersuchungen neu interpretieren. Whitaker stellte z.B. fest, daß viele Schüler bei der Bearbeitung von

Testaufgaben den Luftwiderstand als Faktor einbeziehen, auch wenn davon in der Aufgabe keine Rede ist. Er fragt:

If students are specifically instructed to ignore air friction, will they? The possible role that air friction plays in students' response to these questions is an important one, and needs to be further clarified in future research.
(Whitaker 1983, 355)

Der Denkraum 1 "Realisationsdenken" ermöglicht die Einordnung der Whitaker-schen Ergebnisse in eine generelle Disposition des Schülerdenkens.

Neben dem aus Verhaltensbeobachtungen gewonnenen Protokollmaterial haben die schriftlichen Befragungen wichtige Aufschlüsse über allgemeine Merkmale der Zugriffsweisen auf mechanische Phänomene und Begriffe erbracht. Teile davon sind nicht in Kapitel C der vorliegenden Arbeit eingeflossen, sondern werden in das historisch-wissenschaftstheoretische Kapitel D eingearbeitet (siehe D.3.4).

Die wissenschaftstheoretischen Elemente des thematischen Vorverständnisses haben als Hintergründe für Kommunikationsschwierigkeiten bzw. Mißverständnisse zwischen Schülern und Lehrern im Physikunterricht eine ebenso große Bedeutung wie die themenspezifischen Präkonzepte. Das gilt insbesondere für den grundlegenden Denkraum 1.

C.4.4 Interessen

Eine Erweiterung des Erkenntnisstandes ist auch die Darstellung der Interessenstruktur als Teil des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik - und zwar als Ergebnis eines kombinierten Verfahrens aus direkten Befragungen (differenzieller Interessentest nach Todt) und der Interpretation von Unterrichtsprotokollen. Aussagen über allgemeine Interessen sind in der Literatur rar. Von Weltner (1980) und Lind (1982) liegen Berichte über Interessenbefragungen vor, von denen sich jedoch eine auf die Sekundarstufe I bezieht (Weltner: 5.-10. Klassen), die andere wenig über die Beliebtheit der ermittelten Interessenfaktoren aussagt (Lind) und beide nicht spezifisch auf Unterrichtsgegenstände der Mechanik ausgerichtet sind. Außerdem fehlt bei den Studien die Diskussion der Ergebnisse an Belegen aus der direkten Unterrichtsbeobachtung.

Am Ende von Punkt A.1.4, in dem die Interessen als Teil des Vorverständnisses eingeführt wurden, haben wir offengelassen, ob schriftliche Interessenbefragungen oder die Interpretation des beobachtbaren Unterrichtsverhaltens von Schülern validere Aussagen über die Interessenstruktur ermöglichen. Nach Abschluß der

empirischen Arbeiten können wir dazu drei Thesen formulieren:

1. Über Interessen an ganz spezifischen Einzelthemen lassen sich mit keiner der beiden Methoden Aussagen machen, die für die Planung von Kursverläufen oder die Rekonstruktion beobachteten Schülerverhaltens große Relevanz hätten. Um ein Beispiel zu nennen: Eines der beliebtesten Items des differentiellen Interessentests ITM (siehe B.2.2.1) lautete: "Einen Film anschauen, der die Planetenbewegung erläutert" (I51/71). Beobachtungen in zwei Kursen, in denen ein entsprechender Film lief, zeigten aber ein eher lustloses Schülerverhalten. Der Streifen wurde für langweilig erklärt und mit mehr oder weniger geistreichen Kommentaren unterlegt. Das Maß an Aufmerksamkeit und aktiver Zuwendung, das Schüler für bestimmte Einzelthemen aufbringen, hängt stark von den akzidentellen Rahmenbedingungen ab, unter denen das Thema behandelt wird, und von der Art der Darstellungsweise - z.B. auch von der Machart der eingesetzten Medien.

2. Möglich und sinnvoll sind dagegen Aussagen über allgemeine Interessen und Interessen mittlerer Spezifität. Zur zweiten Kategorie zählt das Interesse an der Dynamik von Bewegungen (SII). Es wurde aus der Analyse von Unterrichtsprotokollen gewonnen. Schülerinteressen wurden von uns primär durch die Auswertung von Unterrichtsprotokollen ermittelt. Die Leitfragen lauteten:

- Welche Themen sprechen Schüler im Unterricht von sich aus an?
- Welche Lehrerimpulse nehmen sie bevorzugt auf?
- Wie verhalten sie sich in selbstbestimmten Arbeitsphasen (SVUs)?

Auf diesem Wege wurden die allgemeinen Interessen 1 bis 4 bestimmt. Aus den Ergebnissen der schriftlichen Befragungen sind die ermittelten Interessenfaktoren in die Entwicklung und Diskussion der Elemente AI2 bis AI4 eingeflossen. Im Gegensatz zur Beliebtheit von Einzelitems sind die Beliebtheitsindizes der Faktoren recht aufschlußreich. In den Faktoren kommen die Grundzüge der Interessenstruktur zum Ausdruck.

3. Aussagen über Interessen haben im Rahmen einer Arbeit über das Schülervorverständnis nur dann einen Sinn, wenn sich ihre Relevanz für das Verständnis tatsächlichen Unterrichtsverhaltens belegen läßt. Daher ist eine Diskussion anhand von Protokollmaterial unerlässlich. Schriftliche Befragungen dienen zur Ergänzung der Datenbasis. Wir haben in Kapitel B Daten aus beiden Erhebungsverfahren verzahnt. Das ermöglichte uns Aussagen über die Interessenstruktur von Schülern der Sekundarstufe II bei der Auseinandersetzung mit dem Themengebiet Mechanik, die den bisherigen Erkenntnisstand über das diesbezügliche Schülervorverständnis um eine neue Klasse von Elementen erweitern.

C.4.5

Methodik

Zu den Standardverfahren zur Gewinnung von Daten über Schülervorstellungen, die auch in den unter Punkt C.2 referierten Arbeiten zu finden sind, zählen:

1. Schriftliche Erhebungen mit Denkaufgaben

In Denkaufgaben werden Probleme vorgelegt, die durch verbale Beschreibungen oder Zeichnungen ohne großen Rechenaufwand zu lösen sind. Es werden nur die elementarsten Formelkenntnisse vorausgesetzt. Die Lösungen erfordern dafür ein tiefes Verständnis der grundlegenden mechanischen Begriffe und Prinzipien. Als Muster können die Aufgaben B1 und B2 des Tests DAM dienen (siehe B.2.2.2).

2. Experimentalinterviews

Schülern werden einfache Phänomene vorgeführt (Fallexperimente, Bewegung von Kugeln in Rollschienen). Die Probanden werden aufgefordert, ihre Beobachtungen zu beschreiben und den Vorgang zu interpretieren. Beispiele dazu finden sich unter Punkt C.2.4. Eine andere Möglichkeit, die McCloskey verwendet hat, besteht darin, Schülern praktische Aufgaben zur Realisation bestimmter Bewegungen zu geben (siehe C.2.7).

3. Probleminterviews

Interviews über Probleme des Typs "Denkaufgabe", z.T. im unmittelbaren Anschluß an schriftliche Erhebungen.

4. Assoziations- und Definitionstests

5. Aussagenbewertung

Den Schülern werden Listen mit Aussagen vorgelegt, die als richtig oder falsch bewertet werden sollen. Zwei Beispiele aus Jung (1981a):

- "Kraft und Gegenkraft heben einander auf."
- "Im Gleichgewichtszustand herrscht Ruhe."

Von B. Schenk wurde das Verfahren entwickelt, Schüler in Gruppen über Aufgabenpakete ("Evaluationsaufgaben") diskutieren zu lassen und die aufgezeichneten Gespräche zu interpretieren (siehe C.2.11). Jung arbeitet an einem ähnlichen Verfahren: Bei der Methode des "lauten Denkens" sollen die Versuchspersonen ihre Gedanken aussprechen, während sie an der Lösung einer Aufgabe arbeiten.

Wir haben die Verfahren 1, 4 und 5 beim Aufbau der Datenbasis verwendet. Vereinzelt wurden Kurzinterviews während Gruppenarbeitsphasen im Unterricht durchgeführt.

Unsere Hauptdatenquelle bestand in der fortlaufenden Unterrichts- bzw. Wortprotokollierung ausgewählter Mechanikkurse. Auf dieser sehr arbeitsintensiven Methode der Datensammlung beruhen nur wenige Untersuchungen über Schülervorstellungen - wenn man von der Protokollierung kurzer Unterrichtsabschnitte absieht (z.B. in Minstrell 1982). Eine Ausnahme bildet die Dissertation von Driver (1973), die über mehrere Monate eine kleine Gruppe von Schülern in einem Mechanikkurs beobachtete und ihre Gespräche aufzeichnete.

Die Methode der zusammenhängenden Protokollierung von Physikkursen wurde bisher nicht in vergleichbarer Konsequenz und mit vergleichbarem Umfang des gewonnenen Datenmaterials angewendet. Die Vor- und Nachteile des Verfahrens sind bereits unter Punkt B.2.1.2 dargelegt worden. In Stichworten lauten die besonderen Vorteile:

- Die Daten stammen aus der Normalsituation des Mechanikunterrichts (im Gegensatz zu klinischen Testsituationen).
- Die Schüler haben - bei entsprechend angelegtem Unterricht - mehr Spielraum zum Einbringen eigener Ideen als in strukturierten Interviews oder schriftlichen Tests.
- Die Beobachtung des Unterrichtsverhaltens über lange Zeiträume eröffnet den Zugang zur Ermittlung unterrichtsrelevanter Interessen.
- Es lassen sich typische unterrichtliche Konfliktsituationen ermitteln (gegenseitiges Nicht- bzw. Mißverstehen von Lehrer und Schülern) und deren im unmittelbaren Unterrichtsgeschehen oft verborgen bleibenden Hintergründe exemplarisch aufzeigen (Rekonstruktion der Unterrichtssituation).

Für die Konstruktion des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik und seine Darstellung im Kapitel B der vorliegenden Arbeit hat sich die Verzahnung von Wortprotokollinterpretationen und Ergebnissen schriftlicher Erhebungen als erfolgreich erwiesen. Beide Datenerhebungs- und -auswertungsverfahren befruchten sich gegenseitig:

- Aus Unterrichtsprotokollen gewonnene Hypothesen über Vorverständniselemente können an größeren Populationen getestet werden (z.B. Präkonzept 5 "Kopplung von Trägheit, Gewicht, Reibung" anhand der Denkaufgaben B3 und B6 des Tests DAM).
- Ergebnisse aus schriftlichen Befragungen können anhand von Unterrichtsprotokollen auf ihre Relevanz für die Normalsituation des Mechanikunterrichts geprüft werden (z.B. die aus dem Test VWP ermittelten empiristischen Vorstellungen über die Erkenntnisgewinnung in der Physik).

Für die Aufnahme eines postulierten Elements in das thematische Vorverständnis muß ausschlaggebendes Kriterium immer sein Beitrag für das Verständnis des tatsächlichen Unterrichtsverhaltens von Schülern sein. Diese Frage kann nur anhand von Unterrichtsprotokollen überprüft werden. Wir werden die Erklärungsmächtigkeit der von uns entwickelten Vorverständnisstruktur im Kapitel E noch einmal an längeren Fallstudien zweiter Art (vgl. S. 124) demonstrieren.

Kapitel D

ZUR GENESE DES KRAFTBEGRIFFS

Historische und wissenschaftstheoretische Ausführungen

D.1

Einleitung

Die historische Genese des Kraftbegriffs bzw. einzelne, wichtige Entwicklungsstufen sind Gegenstand vieler Monographien (z.B. Herivel 1965, Jammer 1957, Mach 1917, Rosenberger 1895, Wolff 1978). In Übersichtswerken zur Geschichte physikalischer Begriffe und Theorien wird Kraft ausführlich abgehandelt (z.B. Crombie 1977, Hund 1978, Kuznecov 1970). Auch in Arbeiten zum Energiebegriff findet Kraft Berücksichtigung (Breger 1982, Elkana 1974). Wir wollen dem in diesem Kapitel keinen weiteren historischen Abriß hinzufügen. Dazu ist das Thema zu vielschichtig und umfangreich. Eine gute Zusammenfassung kann man bei Heller (1970, 163-184) nachlesen.

Es geht uns ebenso wenig um einen neuen Beitrag zur Wissenschaftsgeschichte - obwohl das Thema noch genügend offene Fragen bietet. So sah sich Jammer 1957 als Erster, der eine historisch-kritische Analyse zum Kraftbegriff anfertigte. Er wies darauf hin, daß die eng begrenzte Bedeutung, die der Begriff Kraft in der klassischen Physik hat, nicht genügend ins Bewußtsein vorgedrungen sei.

Although placed in the front rank of our scientific conceptual scheme, the concept of force has never been subjected to a comprehensive historico-critical analysis. Even today it is not yet generally recognized that during its long history the concept of force developed into an auxiliary or intermediate concept of primarily methodological importance. Only too often (and not only in elementary or introductory courses in physics) "force" is interpreted in the traditional animistic or Peripatetic manner as a "tendency" or "striving". Only too often is it stated that one force "overcomes" another force.
(Jammer 1957, Vf)

Jammers Ausführungen leiten zu den Gründen über, in die vorliegende Arbeit ein historisch-wissenschaftstheoretisches Kapitel aufzunehmen: Anlaß und Auswahlkriterium für die behandelten Aspekte sind fachdidaktische Überlegungen:

1. Das Schülervorverständnis zur Mechanik zeigt in Teilen Anklänge zu frühen physikalischen Theorien. Die genauere Kenntnis der entsprechenden historischen Entwicklungsstufen trägt zum Verständnis der Schülerpräkonzepte und -denkrahmen bei.
2. Die Probleme von Schülern beim Aufbau physikalisch produktiver Denkrahmen und allgemeiner Interessen zeigen Parallelen zum Übergang vom aristotelischen zum galileisch-newtonschen Wissenschaftsverständnis, der als Geburtsstunde der modernen Naturwissenschaft gilt. Das Wissen um die historische Schwelle erhellt die Probleme der Schüler.
3. Das Festhalten der Schüler an einem umfassenden, intuitiven Kraftbegriff auch nach der Behandlung der Newtonschen Theorie im Unterricht hat Anklänge zur Durchsetzungsgeschichte der Newtonschen Kraftvorstellung nach

Veröffentlichung der 'Principia'. Die Reflexion der wissenschaftsgeschichtlichen Prozesse macht die Akzeptanzproblematik auf seiten der Schüler verständlicher.

Die Orientierung an fachdidaktischen Gesichtspunkten ermöglicht eine begründete Auswahl aus der Fülle des vorliegenden Materials zur Genese des Kraftbegriffs. Es ergeben sich drei Aufgaben- bzw. Fragerichtungen:

- Darstellung derjenigen Entwicklungsstufen der Mechanik, die Bezüge zu Schülervorstellungen haben. (Punkt D.2)
- Herausarbeitung und Gegenüberstellung der grundsätzlichen Merkmale des aristotelischen und des galileisch-newtonschen Zugangs zur Natur: Was ist das Eigentümliche/Neue der modernen Naturwissenschaft? (Punkt D.3)
- Wie reagierte die Forschergemeinschaft auf den Newtonschen Kraftbegriff?
 - Wie wurde seine Bedeutung für die Physik eingeschätzt?
 - Welche alternativen Konzepte wurden verfolgt?
 - Welche Widerstände wurden ihm entgegengebracht? (Punkt D.4)

Nach diesen drei Komplexen ist das vorliegende Kapitel strukturiert.

D.2 Entwicklungsstufen der Mechanik mit Bezug zum Schülervorverständnis

Als historische Entwicklungsstufen der Mechanik mit Bezug zum Schülervorverständnis kommen besonders in Betracht die Aristotelische Bewegungslehre und die Impetustheorien. Das ergibt sich aus der Struktur des thematischen Vorverständnisses. In manchen Veröffentlichungen über Präkonzepte zum Kraftbegriff wird auf historische Parallelen verwiesen oder, es werden sogar Originaltexte zitiert (z.B. McCloskey 1983, Champagne 1980, Whitaker 1983).

Wir sehen den Sinn einer geschichtlichen Aufarbeitung darin, ein besseres Verstehen der Schüler zu bewirken. Die Kenntnis historischer Beschreibungs- und Erklärungsmuster erweitert die Möglichkeiten, auf Schüleräußerungen hinzuhören, die von der im Unterricht vermittelten Sichtweise abweichen. Es wird zudem leichter, Aussagen, die im Lichte des heutigen Entwicklungsstands als falsch gelten, als gedankliche Leistungen des Schülers von eigenem Wert anzuerkennen, wenn man weiß, daß anerkannte Philosophen und Physiker in ähnlichen Bahnen gedacht haben. Das Studium der Historie dient in diesem Sinne der Erweiterung des Aufnahmehorizonts für Schüleraussagen.

Die Ergebnisse historischer Studien können aber auch inhaltlich unterrichtsrelevant werden. In einem historisch orientierten Physikunterricht dienen sie als Leitlinie für Inhalt und Ablauf (z.B. Bayer 1983). Für einen historisch-genetischen Unterricht sind sie Grundlage der "systematischen, rationalen Rekonstruktion der Entstehungsprozesse der wichtigsten Prinzipien, Begriffe und Theorien, die das Fundament der Naturwissenschaft bilden" (Pukies 1979, 52). In einem am Schülervorverständnis orientierten Physikunterricht (SVU) bilden historische Texte eine Materialreserve, auf die dann zurückgegriffen wird, wenn Schüler von sich aus zu vergleichbaren Aussagen kommen. Der Textesatz erfolgt nicht primär unter dem Gesichtspunkt der Einbringung historischer Informationen. Die Schüler sollen vielmehr in den Texten Formulierungshilfen für die Explizierung bzw. Abgrenzung ihrer eigenen Vorstellungen finden. Die Erfahrung, daß physikalische Ideen einem geschichtlichen Wandel unterliegen, soll zudem in der Vergleichsphase des SVU der Gefahr der Frustration auf seiten der Schüler vorbeugen, wenn ihre Ergebnisse vom heutigen Erkenntnisstand abweichen. Ein Beispiel für den Einsatz historischer Texte in einem SVU wird in Fallstudie 2 gegeben (Punkt E.3; Seite 514ff). Es ist darüberhinaus möglich, die Vorstellung des heute gültigen Erkenntnisstandes anhand von Auszügen aus Originalveröffentlichungen vorzunehmen.

D.2.1

Die Bewegungslehre des Aristoteles

Bei der Charakterisierung von Schülerpräkonzepten oder -denkrahmen als "aristotelisch" (z.B. Präkonzept 3-2 "In Richtung der Bewegung wirkt eine Kraft") muß man sich darüber bewußt sein, daß damit nur ganz spezifische Ausschnitte aus dem Werk des Aristoteles gemeint sein können und die zugrundeliegende Kosmologie außer Betracht bleibt.

Aristoteles teilt Bewegungen in zwei Klassen ein:

1. "Natürliche" Bewegungen.

"Jeder Körper bewegt sich, wenn er nicht gehindert wird, an seinen eigenen Ort, der eine nach oben, der andere nach unten" (Aristoteles nach Samburski 1978, 99). Dazu zählt im wesentlichen die Fallbewegung. Ein Stein fällt, weil er von einem unnatürlichen, erhobenen Ort seinem natürlichen Ort, der Erdoberfläche, zustrebt. Aristoteles geht nicht von einem Konzept der Gravitation oder der gegenseitigen Anziehung aus (vgl. Goehring 1979, 152). Die Ursache der natürlichen Fallbewegung liegt im Körper selbst. Er hat eine innere Tendenz, sich zu dem ihm im geordneten Universum des Aristoteles zukommenden Ort hinzubewegen. Aus demselben Grund bewegen sich Luftblasen im Wasser nach oben. Die Zunahme der Geschwindigkeit einer Fallbewegung in Luft erklärt Aristoteles damit, daß ein Körper um so schneller wird, je näher er seinem natürlichen Ort "als dem Ziel und der Erfüllung seiner natürlichen Bewegung kommt" (Crombie 1977, 285).

2. "Erzwungene" bzw. "gewaltsame" Bewegungen.

Erzwungene Bewegungen sind solche, die naturgemäßen Bewegungen zuwiderlaufen. Unbelebte Körper, die keine "Seele" besitzen, bedürfen für eine erzwungene Bewegung eines externen Bewegers, wenn sie sich von ihrem natürlichen Ort wegbewegen oder von einer natürlichen Bewegung abweichen sollen. Bei Fortfall des externen Bewegers, bzw. der "bewegenden Kraft" kommt die Bewegung zum Stillstand. Der Begriff "Kraft" wird in zwei ineinander verwobenen Bedeutungen zur Quantifizierung einer Bewegungsfähigkeit verwendet, die von einem speziellen Beweger abstrahiert ist. Zum einen ist Kraft das Vermögen, einen Körper in einer bestimmten Zeit über eine bestimmte Strecke zu bewegen (Arbeitsfähigkeit gegen Reibungskräfte gekoppelt mit Leistung); zum anderen bezeichnet Kraft die Fähigkeit, einen Körper aus dem natürlichen Ruhezustand in Bewegung zu setzen (z.B. Überwindung der Haftreibung). Die beiden Bedeutungen treten in den folgenden Zitaten zutage:

Wenn A das Bewegende ist und B das Bewegte, ferner C die Strecke, die die Bewegung durchlaufen hat, und D die Zeit, in der die Bewegung abläuft, dann wird in der gleichen Zeit dieselbe Kraft A die Hälfte von B über eine Strecke hinbewegen, die doppelt so lang ist wie C, über die Strecke C hinweg dagegen in der Hälfte der Zeit D; so nämlich bleibt die Proportion gewahrt.

(Aristoteles nach Samburski 1978, 108)

Man darf ... aus der Tatsache, daß eine Kraft einen bestimmten Gegenstand über eine bestimmte Strecke in einer bestimmten Zeit bewegen kann, (nicht) schließen, daß die halbe Kraft ihn in einer entsprechenden Zeit über eine entsprechende Strecke hin bewegt. Wäre dies nämlich so, so könnte auch ein einziger Mann ein ganzes Schiff in Bewegung setzen, wenn man nämlich die gesamte Kraft der Schleppmannschaft aufteilen dürfte auf die Zahl der Leute und auf die Strecke, über die sie alle zusammen das Schiff gezogen haben.

(Aristoteles nach Samburski 1978, 109)

"Kraft" ist nicht beliebig teilbar. Aristotels hat nicht an einen stetigen funktionalen Zusammenhang zwischen Kraft und Wirkung gedacht. Sein Denken verlief ohnehin nicht in mathematischen Bahnen. Die Verhältnisvergleiche des Typs $K_1/K_2 = s_1/s_2$ dienen zur Veranschaulichung eines qualitativen Verständnisses.

First, Aristotle believed that mathematics was of little value in describing terrestrial phenomena. Second, he put great emphasis upon direct, qualitative observation as the basis for theorizing. (Holton 1970,41)

Die Schriften des Aristoteles (384 - 322), von denen die Bewegungslehre nur einen kleinen Teil ausmacht, wurden im 12. Jahrhundert in arabischen Übersetzungen wiederentdeckt. Sie bekamen eine beherrschende Rolle für das scholastische Denken der christlichen Gelehrten bis hin zur Kopernikanisch-Galileischen Wende. Der Aristotelische Bewegungs- und Kraftbegriff ist vielen Alltagssituationen gut angepaßt. Bei Bewegungen unter dem Einfluß starker Reibungskräfte liegt seine Verwendung näher als die des Newtonschen Kraftkonzepts (vgl. Hund 1978, 31f.). Viele Schülervorstellungen entsprechen einem aristotelischen Bewegungsverständnis:

- Zum Aufrechterhalten einer Bewegung bedarf es einer ständigen Kraftwirkung
- Geschwindigkeit ist proportional zur Kraft
- Kraft bedeutet Leistungs- oder Wirkungsvermögen
- Ruhe und Bewegung sind grundsätzlich zu unterscheiden

Ja noch mehr: Auch der in jahrelangen Studien geschulte Physiker hat sein aristotelisches Denken noch nicht völlig überwunden, wie Experimente mit Studenten jederzeit aufweisen können. (...) Zahlreiche Situationen des Alltags gehorchen den Ideen der Aristotelischen Physik. Die Newtonsche Bewegungslehre ist nur auf einem recht komplizierten Umweg darauf anwendbar.

(Sextl 1982, 128)

Wir wollen zwei aristotelische Phänomenbeschreibungen näher betrachten. Der einen (zum freien Fall) werden enge Bezüge zu Schülervorstellungen zugeschrieben (z.B. von Pukies 1979); die andere (zum Wurf) spielte für die Weiterentwicklung des Kraftbegriffs eine bedeutende Rolle, weil sich an ihr die Kritik der Aristotelischen Bewegungslehre entwickelte, die zur Impetustheorie führte. Die Impetustheorie wiederum trägt in großem Maße zum Verstehen von Schüleräußerungen über mechanische Phänomene bei.

Freier Fall

Ein Körper A soll durch das Medium B bewegt werden in der Zeit C; das dünnere Medium D dagegen wird er durchlaufen in der Zeit E. Wenn nun die Länge der Strecken B und D dieselbe ist, so werden die Durchlaufzeiten C und E der Dichte des Körpers, der Widerstand leistet, proportional sein. (...) Allgemein gilt demnach: je unkörperlicher und weniger Widerstand leistend und durchlässiger das Medium ist, durch das sich der Körper A bewegt, desto schneller wird er sich bewegen. (...) Was nun die Verschiedenheit der bewegten Körper selbst betrifft, so geschieht folgendes: wir sehen, daß diejenigen Körper, die eine größere Schwere oder Leichtigkeit besitzen, dieselbe Strecke (nach unten oder nach oben) schneller durchlaufen, wenn alle übrigen Verhältnisse dieselben sind, und zwar in demselben Verhältnis, in dem sich ihre Größen zueinander verhalten.
(Aristoteles nach Samburski 1978, 101f)

Das sogenannte "Aristotelische Fallgesetz" wird meist angegeben als

$$\text{Fallgeschwindigkeit (v)} = \frac{\text{Schwere des Körpers (S)}}{\text{Dichte des Mediums (D)}}$$

(vgl. Hund 1978, 31)

Dazu sind einige Anmerkungen zu machen.

1. Aristoteles selbst hat nie eine ähnliche Formulierung verwendet. Er hat lediglich Proportionen gleicher Größen angegeben (Fallzeiten t_1/t_2 verhalten sich wie die Dichten D_1/D_2). Etwas anderes war nach griechischer Auffassung nicht zulässig.
2. Der Begriff der Geschwindigkeit bleibt bei Aristoteles unbestimmt (Endgeschwindigkeit einer beschleunigten Bewegung, Durchschnittsgeschwindigkeit oder Gleichgewichtsgeschwindigkeit bei einer Relaxationsbewegung) - zumal zusammengesetzte Größen wie $v = s/t$ nicht möglich waren (s.o.). Es ist am ehesten gerechtfertigt, von der Fallzeit zu sprechen.
3. Der gewichtigste Einwand stammt von Wolff (1971, 14ff). Wolff stellt in Abrede, daß man die beiden Proportionalitäten $t \text{ prop. } 1/S$ und $t \text{ prop. } D$ über-

haupt zu einem Gesetz $t \propto \sqrt{S}$ zusammenfassen darf. Aristoteles habe keine logische Verknüpfung der beiden Einzelaussagen im Auge gehabt. Sie seien noch nicht einmal einzeln als empirisch überprüfbare Hypothesen aufzufassen, sondern lediglich als Konvention, als übereingekommene Ausgangsbasis im Streit mit den Atomisten über die Existenz des Vakuums. Genausogut hätte er als Konvention $t \propto \sqrt{D}$ annehmen können. In jedem Fall wäre für $D = 0$ die Bewegung instantan und damit die Möglichkeit eines Vakuums widerlegt.

Mir erscheint die an Originalzitaten belegte Argumentation von Wolff gerade deshalb als erhellend, weil sie die Verwunderung darüber beseitigt, daß ein so hervorragender Denker wie Aristoteles wider alle Erfahrung behaupten konnte, die Fallzeiten zweier Steine mit dem Massenverhältnis 1 zu 10 verhielten sich wie 10 zu 1. Das Interesse von Aristoteles galt nicht so sehr dem Aufstellen von Bewegungsgesetzen als dem Nachweis der Unmöglichkeit des Vakuums. Nicht zufällig erfolgen die Ausführungen zur Bewegung bei der Diskussion des Vakuums (siehe Seite 420). Diese Feststellungen sind auch bedeutsam für eine Einschätzung der "Widerlegungen" des Fallgesetzes durch Philoponus und Galilei.

Trotz dieser Einwände werden wir die Bezeichnung von $v \propto \sqrt{S/D}$ als Aristotelisches Fallgesetz beibehalten, da sie sich so eingebürgert hat. Die Abhängigkeit der Fallzeit von der Masse, bzw. dem Gewicht des fallenden Körpers und der Dichte des Mediums in je-desto-Beziehungen ist eine der stabilsten Schülervorstellungen. Sie entspricht der Alltagserfahrung, daß ein Stein schneller auf den Erdboden fällt als ein Blatt. Das Erstaunen darüber, daß ein Stück Kreide in der gleichen Zeit den Fußboden des Physikraums erreicht wie eine viel schwerere Stahlkugel, ist meist sehr groß. Angelehnt an die Ausführungen Wolffs sollte man allerdings vorsichtig sein, den je-desto-Beziehungen, soweit sie von Schülern geäußert werden, ein Gesetz $v = \text{const.} \cdot \sqrt{S/D}$ unterzuschreiben. (Ich meine, Pukies (1979, 139ff) macht diesen Fehler.)

Wurf

Die Erklärung der Wurfbewegung war eines der zentralen Probleme antiker und mittelalterlicher Bewegungslehren. Seine endgültige Lösung wurde erst nach Einführung des Trägheitsprinzips möglich. Für Aristoteles ging es darum, einen Bewegter zu identifizieren, der die Bewegung des geworfenen Steins vorantreibt, wenn er die Hand der Werfers verlassen hat ("Alles Bewegte wird von etwas bewegt"). Dafür kam nur die Luft in Frage, denn mit ihr hat der Stein Kontakt. Die Luft kann jedoch nur bewegen, wenn auch sie selbst bewegt wird.

Wie sollte das der Fall sein, wenn die werfende Hand ruht? Aristoteles argumentiert folgendermaßen: Der "erste Bewegte" (die Hand der Werfers) teilt der ihm nächsten Luftschicht nicht nur Bewegung mit, sondern auch die Fähigkeit ihrerseits etwas anderes zu bewegen (die nächste Luftschicht, bzw. den Stein). Eigenbewegung und Fähigkeit anderes zu bewegen erlöschen nicht gleichzeitig, so daß die erste Luftschicht die zweite noch bewegen kann, wenn sie selbst bereits ruht. So pflanzt sich die Bewegungskraft durch die Luftschichten bis zum Stein fort (eine Art Nahwirkungstheorie). Von Übertrag zu Übertrag nimmt die Fähigkeit, anderes zu bewegen, immer mehr ab und die Wurfbewegung erlahmt, bzw. der Stein folgt nur noch seiner natürlichen Fallbewegung.

Nun ist es allerdings notwendig, daß das erste Bewegende die Luft oder das Wasser oder irgend etwas anderes dieser Art das fähig ist, bewegt zu werden und selber zu bewegen, mit der Fähigkeit zu bewegen ausstattet. Es braucht indessen die Bewegung des Bewegenden und diejenige des Bewegten nicht gleichzeitig aufzuören, sondern in dem Augenblick, in dem das Bewegende zu bewegen aufhört, hört das Bewegte zwar auch auf, bewegt zu werden, behält aber noch seine Fähigkeit zu bewegen. Darum kann es auch ein Anderes in Bewegung setzen, das mit ihm in Berührung steht. Für dieses gilt wiederum dasselbe. Dieser Prozeß kommt erst dann zum Stillstand, wenn das Anschließende eine immer geringer werdende Fähigkeit, in Bewegung zu setzen, erhält. Das Ende der Bewegung ist schließlich erreicht, wenn das vorletzte Glied das letzte nur noch in Bewegung setzen, aber ihm nicht mehr die Fähigkeit weitergeben kann, anderes in Bewegung zu bringen.
(Aristoteles nach Samburski 1978, 109f)

Eine solche Erklärung der Wurfbewegung findet sich heute nicht mehr. Dafür ähneln Schülerbeschreibungen stark der Impetustheorie, die die komplizierten und zu Widersprüchen führenden Auslegungen des Aristoteles überwand.

D.2.2 Impetustheorie

Der von Pierre Duhem eingeführte Name "Impetustheorie" bezeichnet eine Gruppe von Bewegungslehren, die im 13. und 14. Jahrhundert stark diskutiert wurden. Als Urvater der Impetustheorie(n) gilt Johannes Philoponus, der um 500 n. Chr. lebte. Seine Ideen wurden, z.T. vermittelt über arabische Naturphilosophen wie Avicenna, im 13. Jahrhundert wiederentdeckt und weiterentwickelt (Jean Buridan, Nicole Oresme, Albert von Sachsen u.a.). Kristallisationspunkt der Impetustheorie war eine Kritik der aristotelischen Bewegungslehre. Ihr Anwendungsbereich umfaßt jedoch mehr als nur die Beschreibung von Bewegungen.

Die Lehren der Impetustheorie galten im Mittelalter als in manchen Bereichen den Aristotelischen Schriften überlegen. Sie konnten die Vorherrschaft des aristotelischen Denkens aber nicht brechen, zumal die auf Hierarchie, Ordnung und Zweck beruhende Philosophie der peripatetischen Schule mit dem Herrschaftsmodell der feudalistischen Gesellschaftspyramide gut harmonierte.

Wolff (1978, 16f) beschreibt das einigende Charakteristikum der Impetustheorien folgendermaßen:

Alle diese Dynamiken stimmen darin überein, daß sie eine Entäußerung und Mitteilung von Kräften von einem Körper auf einen anderen für möglich, ja für notwendig halten, wenn Bewegung eines Körpers durch Bewegung eines anderen erklärt werden soll. Die Auffassung, daß Bewegungsübertragung nicht ohne Vermittlung eines bestimmten übertragenen Kraftquantums möglich ist, ist ihre gemeinsame und wesentliche Grundlage.

Die übertragbare Kraft gelte in allen Impetustheorien als "unkörperliche" Bewegungsursache, die den körperlichen Bewegter verlassen und auf den bewegten Körper übergehen müsse, um als Bewegungsursache wirken zu können. Es habe jedoch keine genau quantifizierte Bewegungsgröße gegeben. Dauer, Wucht, Schwung, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Weite usw. seien nebeneinander genannt worden.

Der wesentliche Fortschritt gegenüber Aristoteles bestand im Fortfall der Notwendigkeit eines externen Bewegers. Die bewegende Kraft bekommt ihren Sitz im bewegten, bzw. "sich bewegenden" Körper selbst. Dadurch wurde z.B. die Behandlung der Wurfbewegung vereinfacht. Vom Werfer wird auf den geworfenen Körper eine Kraft übertragen ("vis impressa": eingeprägte Kraft). Diese Kraft befähigt den Körper, sich selbst zu bewegen und, z.B. beim Aufprall auf ein Hindernis, Wirkungen zu erzielen. Wer kennt aus dem Unterricht nicht ähnliche Erklärungsansätze von Schülern ("Bewegte Körper haben Kraft"; "Beim Stoß wird Kraft übertragen"; "Die Kraft des Körpers zeigt beim Aufprall Wirkung"; vgl. das Präkonzept 3-1, Punkt B.3.3.2.2).

Mit dem Übergang der Kraft als Bewegungsursache auf den in Bewegung befindlichen Körper wurde der Blick dafür frei, das Medium als Widerstand zu konzeptualisieren, denn es wird nicht mehr benötigt, um, wie bei Aristoteles und anderen Autoren der Antike, als Beweger zu fungieren. (Es gab in der Antike Vorstellungen, nach denen die Luft, die von dem geworfenen Stein verdrängt wird, hinter ihm wieder zusammenschlägt und so den Stein vorwärtsstößt.)

Von Philoponus stammt ein eigenes, aus der Kritik an Aristoteles entwickeltes Fallgesetz, das man heute so formulieren würde:

$$t = c_1 \cdot D + c_2 \cdot 1/S \quad (c_1, c_2 = \text{const.}) \quad (\text{nach Wolff 1971, 24ff})$$

$$\text{oder} \quad t = c \cdot D + t_0 \quad (c = \text{const.}) \quad (\text{nach Hund 1978, 34})$$

Nach seiner Ansicht werden Fallbewegungen von nichts anderem als von der inneren Schwere als erzeugender Ursache bewirkt. Die aristotelische Vorstellung $t \propto 1/S$ wird beibehalten. Die Schwere S bestimmt die Grundfallgeschwindigkeit, bzw. die Grundfallzeit t_0 . Die Medien schränken das Maß der erreichten Geschwindigkeit lediglich ein.

Interessanter als die mathematische Formulierung des Fallgesetzes ist im Hinblick auf Schülervorstellungen die grundsätzliche Beschreibung des Phänomens durch die Impetustheorie, die auch den konzeptuellen Fortschritt verdeutlicht. Die Trennung zwischen natürlichen (Fall-)Bewegungen und erzwungenen (Wurf-)Bewegungen entfällt zugunsten des Impetusprinzips als übergreifender Erklärungstheorie. Der Grundgedanke lautet, daß die Geschwindigkeit eines Körpers von der eingprägten Kraft abhängt. Zunahme der Geschwindigkeit beim Fall bedeutet Zunahme des Impetus. Jean Buridan führt aus:

Zuerst bewegte ihn (den fallenden Körper, d.V.) nur die Schwere; daher bewegte sie ihn langsamer, aber durchs Bewegen imprimiert sie dem schweren Körper selbst einen Impetus, der freilich dann zusammen mit der Schwere bewegt; daher wird die Bewegung schneller, und je schneller sie wird, desto intensiver wird der Impetus; daher wird offensichtlich die Bewegung kontinuierlich schneller.
(Buridan nach Wolff 1978, 222)

Für den Wurf gilt folgende Beschreibung des Bewegungsverlaufs: Zunächst wird vom Werfer auf den geworfenen Körper eine Kraft übertragen, vermittels derer er sich fortbewegt. Im Verlauf der Bewegung wird dieser Impetus durch den Widerstand des umgebenden Mediums aufgezehrt, bzw. das Medium verstärkt das natürliche Erschlaffen des Impetus. (Darüber, ob der Impetus auch ohne ein Medium abnehmen würde, gab es unterschiedliche Auffassungen.) Ab einem gewissen Punkt der Bewegung gewinnt allmählich die Schwere überhand und der

Körper beginnt zu fallen. Schließlich, wenn die vom Werfer aufgeprägte Kraft ganz verbraucht ist, fällt der Körper senkrecht nach unten.

Wir müssen schließen, daß ein Bewegter, wenn er einen Körper bewegt, diesem einen bestimmten Impetus aufdrückt, eine bestimmte Kraft, die diesen Körper in der Richtung weiterzubewegen vermag, die ihm der Bewegter gegeben hat, sei es nach oben, nach unten, seitwärts oder im Kreis. Der mitgeteilte Impetus ist in dem gleichen Maße kraftvoller, je größer der Aufwand an Kraft ist, mit dem der Bewegter dem Körper Geschwindigkeit verleiht. Durch diesen Impetus wird der Stein weiterbewegt, nachdem der Werfer aufgehört hat, ihn zu bewegen. Aber wegen des Widerstands der Luft und auch der Schwerkraft des Steins, die ihn ständig in eine dem Streben des Impetus entgegengesetzte Richtung zwingen möchte, wird der Impetus immer schwächer. Darum muß die Bewegung des Steins allmählich immer langsamer werden. Schließlich ist der Impetus so weit geschwächt oder vernichtet, daß die Schwerkraft des Steins überwiegt und den Stein abwärts zu seinem natürlichen Ort bewegt.

(Buridan nach Crombie 1977, 303)

Ähnliche 3 Phasen Modelle über die Wurfbewegung sind häufig bei Schülern anzutreffen. Mit dem bloßen Auge ist in der Anfangsphase nicht zu entscheiden, ob der Körper von Anfang an fällt. Gegen Ende der Bewegung überwiegt die Vertikalkomponente oft so stark, daß der Eindruck entstehen kann, der Körper falle senkrecht nach unten (siehe Seite 297).

Eine andere Vorstellung, die heute noch in Comic-Filmen zu sehen ist, wird Avicenna zugeschrieben (vgl. Mc Closkey 1983, 91). Danach bewegt sich ein waagrecht geworfener Körper so lange horizontal, bis sein Impetus ganz aufgebraucht ist, und beginnt erst dann zu fallen.

Über den Zusammenhang von Impetus und Bewegung gibt es eine alternative Auffassung von Oresme, nach der beim freien Fall durch den jeweiligen Impetus nicht die Geschwindigkeit, sondern die Beschleunigung mit der Zeit anwächst. Der Anfangsimpetus bewirkt eine Beschleunigung, aus der am Ende eines Intervalls ein neuer, stärkerer Impetus resultiert, der wieder eine größere Beschleunigung bewirkt (vgl. Wolff 1978, 236). Ein spezieller Bezug zu Schülervorstellungen besteht hinsichtlich einer Geschwindigkeitszunahme bei einer Wurfbewegung nach Wegfall des Kontakts zum externen Bewegter, der den Anfangsimpetus auf den Körper übertragen hat.

Deshalb hat eine gewaltsame Bewegung drei Zustände oder drei Teile; der erste besteht, wenn der bewegte Gegenstand mit dem Werkzeug, das die Gewalt ausübt, noch in Verbindung ist; dann wächst die Geschwindigkeit an und die Erzeugung oder das Anwachsen der Geschwindigkeit wächst ebenfalls an. (...) Der zweite Zustand besteht, wenn die gewaltsam bewegte Sache von dem betreffenden Werkzeug oder dem ersten Bewegter getrennt ist; dann wächst die Geschwindig-

keit an, aber die Erzeugung, die Verstärkung und das Wachsen dieser Geschwindigkeit verkleinert sich und hört schließlich ganz auf; dann wächst die Geschwindigkeit nicht mehr und auch nicht jene Qualität oder Stärke. Danach beginnt der dritte Zustand. In diesem bewirkt die natürliche Qualität der bewegten Sache, nämlich die natürliche Schwere, die Verminderung jener nicht natürlichen Qualität oder Stärke, die der natürlichen Bewegung des Gegenstands entgegengesetzt ist, und es verzögert sich die Bewegung und verkleinert sich die Gewalt und hört schließlich auf.
(Oresme nach Wolff 1978, 237)

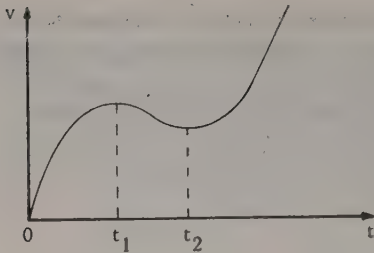
Nochmals die drei Phasen:

1. Der Werfer verleiht dem Stein Impetus. Mit zunehmendem Impetus erhöht sich die Beschleunigung des Steins.
2. Nachdem der Stein die Hand des Werfers verlassen hat, beschleunigt er mittels des ihm verliehenen Impetus weiter. Die Geschwindigkeit nimmt also weiter zu. Durch den Luftwiderstand wird der Impetus allmählich abgebaut. Dadurch verringert sich die Beschleunigung. Der Stein erreicht seine Maximalgeschwindigkeit.
3. Durch weiteren Abbau der Bewegung (neben der Luft wirkt auch die Schwere als Widerstand) wird der Stein immer langsamer, bis seine Bewegung ganz erlischt.

Oresme hat hier nur das betrachtet, was wir heute beim waagerechten Wurf die Horizontalkomponente nennen. Dem überlagert sich die Vertikalbewegung durch den über die Schwere eingepfachten Fallimpetus. Ab dem Ende von Phase 2 würde der Stein zu fallen beginnen. Am Ende von Phase 3 fiel er senkrecht nach unten.

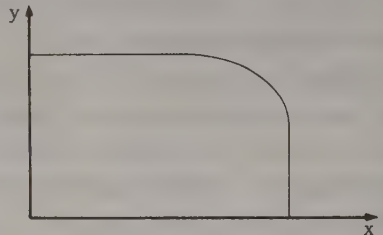
Oresmes Beschreibung des 2. und 3. Teils korrespondiert mit Schüleraussagen, die darauf hinauslaufen, daß zwischen dem Ende einer beschleunigenden Kraftwirkung auf einen Körper und dem Erreichen der Maximalgeschwindigkeit eine zeitliche Verzögerung besteht (vgl. die Ausführungen zu Präkonzept 2, S. 269). Nach Wolff (1978, 229) haben verschiedene mittelalterliche Autoren und selbst Leibnitz erwogen, daß die Wurfbewegung nach der Trennung von Objekt und Werfer anfangs beschleunigt sei.

Ich möchte ein Beispiel aus den empirischen Erhebungen von Schülervorstellungen einflechten. Bei der Behandlung des waagerechten Wurfs in einem Grundkurs der 11. Klasse hatten mehrere Schüler die Ansicht vertreten, eine abgeschossene Kugel werde noch einen Moment lang schneller. In einem Kurzinterview in der anschließenden Pause bat ich die betreffenden Schüler, ein v-t Diagramm zu dem Vorgang zu zeichnen. Es ergab sich das folgende Bild (v ist als Betrag der Gesamtgeschwindigkeit zu verstehen).



Zum Zeitpunkt $t = 0$ verläßt die Kugel den Schußapparat. Ihre Geschwindigkeit steige bis t_1 an, dann nähme sie aufgrund des Luftwiderstands ab. Ab t_2 steige sie wieder an, weil sich inzwischen die Erdbeschleunigung merklich auswirke.

Das x - y Diagramm (x : Wurfweite; y : Fallhöhe) wurde wie nebenstehend gezeichnet. Die Schüler meinten, ab einem bestimmten Zeitpunkt falle der Körper senkrecht nach unten.



Eine ganz ähnliche Abbildung verwendet Crombie (1977, 308) zur Verdeutlichung der Erklärung der Wurfbewegung durch Albert von Sachsen, der einen zusammengesetzten Impetus einführt.

Albert von Sachsen sah in der Wurfbahn eines Geschosses drei Perioden: (1) die Anfangsperiode einer ausschließlich gewaltsamen Bewegung, bei der der aufgezwungene Impetus die natürliche Schwerkraft auslöscht; (2) eine Zwischenperiode mit gemischtem Impetus, in der die Bewegung sowohl gewaltsam wie auch natürlich abläuft; (3) eine Endperiode mit rein natürlicher Bewegung, die vertikal nach unten führt, nachdem natürliche Schwerkraft und Luftwiderstand den aufgezwungenen Impetus überwunden haben.

Eine weitere Parallele zu Schülervorstellungen besteht darin, die Schwere oder die Schwerkraft als Kraft/Energie verzehrenden Widerstand zu betrachten. Manche Schüler machen die Schwerkraft für das Abnehmen der Amplitude eines springenden Balles nach mehrmaligem Auftrumpfen mitverantwortlich (vgl. S. 326).

Die Impetustheorie erhob den Anspruch, alle Bewegungen erklären zu können. Für die Fall- und die Wurfbewegung haben wir das gezeigt. Die Erklärung der Translationsbewegung auf einer festen Unterlage ist denkbar einfach. Der Körper wird irgendwann einmal angestoßen, gezogen oder angeschoben. Dabei erhält er eine eingeprägte Kraft. Dieser Impetus wird während der Bewegung durch den Widerstand der Unterlage aufgebraucht. Wenn die eingeprägte Kraft sich nicht mehr gegen die Widerstände durchsetzen kann, bleibt der Körper stehen

(vgl. ähnliche Erklärungsmuster von Schülern). Der Widerstand des Mediums oder der Unterlage wurde nicht als (Gegen-) Kraft betrachtet. Es bestand eine strikte Trennung zwischen Kräften und Widerständen (vgl. Wolff 1978, 19). Auch Schüler betrachten Reibungswiderstände oft nicht als "richtige" Kräfte, sondern als Hindernisse (vgl. Präkonzept 4 "Kraftausübung als Aktivität").

Zur Erklärung von Kreisbewegungen (Mühlrad, Planetensphären) wurde der Kreisimpetus eingeführt. Den Planeten sei dieser Impetus bei der Schöpfung eingeprägt worden, was das ständige Wirken eines Sphärenbewegers erübrige. Wiederum bestehen gewisse Übereinstimmungen mit Schülerideen von der Kreisbewegung als einem im Kreise herumgeführten Körper eigene Bewegungstendenz, die der Körper tendenziell beibehalte, wenn die Vorrichtung, die ihn vorher auf der Kreisbahn gehalten hat, weggefallen ist (siehe dazu Seite 211ff; weitere, eindrucksvolle Beispiele finden sich bei McCloskey 1983, vgl. Punkt C.2.7).

Fassen wir die Kernaussagen der Impetustheorie über Bewegungen zusammen:

1. Ein Körper bewegt sich aufgrund einer ihm eingeprägten Kraft (Impetus).
2. Diese Kraft wurde dem Körper beim Vorgang des In-Bewegung-Setzens von einem ersten Beweger (einem Menschen oder Gott) eingeprägt oder durch Kontakt (Stoß) mit einem anderen Körper auf ihn übertragen.
3. Ein Körper kann um so mehr Impetus aufnehmen, je schwerer er ist.
4. Die "Bewegungsstärke" (Geschwindigkeit, Schwung, Beschleunigung, Wucht, usw.) des Körpers ist dem Impetus proportional.
5. Der im Körper befindliche Impetus erschlapft mit der Zeit. Dies geschieht entweder von alleine oder es wird durch den Widerstand des Mediums, in dem sich der Körper bewegt, bewirkt bzw. verstärkt.

Der Fortschritt gegenüber dem aristotelischen Bewegungskonzept besteht in den folgenden Punkten:

1. Fortfall des externen Bewegers. (Dadurch wird vor allem die Behandlung von Wurfbewegungen vereinfacht.)
2. Überwindung des Gegensatzes zwischen natürlichen und erzwungenen Bewegungen.
3. Erste Ansätze zur Vereinigung der Behandlung irdischer und himmlischer Phänomene (Kreisimpetus).
4. Konzeptualisierung des Mediums, in dem die Bewegung abläuft, als Widerstand.

Die Impetustheorie war kein vollständiger Bruch mit der aristotelischen Bewegungslehre. Beibehalten wurde die peripatetische Vorstellung von der Proportionalität von Geschwindigkeit und Kraft - nur, daß die Kraft jetzt ihren Sitz im "sich bewegenden" Körper selbst hat. Die Fallgeschwindigkeit hing noch immer im wesentlichen von der Schwere des Körpers ab. Das Vakuum wurde zwar hypothetisch denkbar (vgl. Fallgesetz von Philoponus für Dichte $D = 0$), doch wurde seine tatsächliche Existenz kaum in Erwägung gezogen.

Die Impetustheorie war auch nicht auf dem Wege zum Trägheitssatz. Viele Impetustheoretiker gingen vom Abklingen des Impetus auch ohne den Widerstand eines Mediums aus. Betrachtungen ohne Widerstand waren von keiner großen Relevanz, da ein solches nirgends vorfindbar war. Es war empirisch also gar nicht zu klären, ob das Medium das Erschlaffen des Impetus bewirkt oder nur verstärkt.

Zum letzten wurde der Widerstand nicht als Kraft konzeptualisiert. Das ist verständlich, weil, ganz im Sinne der peripatetischen Tradition, der Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung postuliert wurde, nicht zwischen Kraft und Bewegungsänderung.

Es bestehen bestechende Übereinstimmungen zwischen den Grundannahmen der Impetustheorie und den folgenden Elementen des thematischen Vorverständnisses:

- Denkraum 10 "globales Denken", mit den Erscheinungsformen der Kreisbahnerhaltung und der Kraftspeicherung/-übertragung
- Präkonzept 3 "Kraft als allgemeine Wirkungsfähigkeit" mit der Vorstellung von Kraft (Impetus) als prägender Ursache und Begleitgröße aller mechanischen Vorgänge
- Präkonzept 3-1 "Bewegte Körper haben Kraft", die ihnen beim In-Bewegung-Setzen übertragen wurde und die sie in die Lage versetzt, sich gegen Bewegungswiderstände durchzusetzen
- Präkonzept 3-2 "In Richtung der Bewegung wirkt eine Kraft", die in diesem Fall durch die gespeicherte Kraft (Impetus) gegeben ist
- Präkonzept 4 "Kraftausübung als Aktivität" mit der Differenzierung zwischen "aktiven" Bewegungskräften und passiven Kraft/Impetus verzehrenden Widerständen

Die Impetustheorie kommt dem Schülervorverständnis über das Verhältnis von Kraft und Bewegung weitaus näher als die Newtonsche Dynamik.

D.3 Übergang von der aristotelischen zur galileisch-newtonschen Physik

Eine neue Art der Erkenntnisgewinnung

D.3.1

Einleitung

Wir haben im Abschnitt D.2 äußerliche Ähnlichkeiten der Vorstellungen von Schülern über mechanische Begriffe (Kraft, Bewegung) und bestimmte Bewegungsformen (freier Fall, Wurf) zu frühen naturphilosophisch-physikalischen Theorien diskutiert. Im folgenden Abschnitt sollen nun die tieferliegenden Ursachen der Probleme von Schülern beim Lernen der klassischen Mechanik erörtert werden. Unsere Grundannahme lautet, daß die Übereinstimmungen auf der Ebene der speziellen Präkonzepte Entsprechungen auf der Ebene der allgemeinen Denkrahmen haben, die den grundsätzlichen Zugang zu Naturphänomenen kennzeichnen. Insbesondere gilt das für die Frage des Umgangs mit der unmittelbaren Erfahrung, die bei den Denkrahmen 1 bis 4 eine entscheidende Rolle spielt:

- D1: Realisationsdenken
- D2: Aufgabe der Physik: Realitätserfahrungen erklären
- D3: Physik beschreibt ideale Laborwelten
- D4: Physik liefert eindeutige Ergebnisse

Hier liegt die fachdidaktische Begründung für eine wissenschaftstheoretische Analyse des Übergangs von der aristotelischen zur galileisch-newtonschen Physik. Wir werden in einer Fallstudie zum Schülerverhalten im Physikunterricht (Kapitel E, Punkt E.2) zeigen, daß die Schwierigkeiten mancher Schüler mit dem gedanklichen Konstrukt der reibungsfreien Bewegung und mit dem Begriff der Trägheit - den für die Fortentwicklung der Mechanik entscheidenden Konzepten - u.a. auf Zweifeln am Sinn der Schaffung solcher Konzepte beruhen, die der unmittelbaren Erfahrung nicht zugänglich sind, ja ihr sogar zu widersprechen scheinen. Das Verhaftetbleiben von Schülern in der unmittelbaren Wahrnehmung und die Versuche, das sinnlich Zugängliche und das Meßbare direkt zum Gegenstand der Theoriebildung zu machen, zeigen die Notwendigkeit der Vermittlung der für die Physik seit der Zeit Galileis und Newtons konstitutiven Art der Erkenntnisgewinnung im Unterricht.

Wir stellen den Ausführungen zum Übergang von der aristotelischen zur galileisch-newtonschen Physik und den Charakteristika der neuen Erkenntnisweise sieben einleitende Thesen voran. In einem längeren Exkurs wird an Auszügen aus den 'Discorsi' Galileis Methode dargestellt. Zum Abschluß wird die didaktische Relevanz der Erörterungen an Materialien aus den von uns durchgeführten empirischen Erhebungen zum Schülervorverständnis dargelegt.

D.3.2

Sieben einführende Thesen

- I Der Übergang von der aristotelischen zur galileisch-newtonschen Physik stellt einen grundsätzlichen, qualitativen Wandel der Zugangsweise zu Naturphänomenen und der Ordnung der Erfahrung dar. Die moderne Physik steht in der Tradition dieser neuen Art, Physik zu treiben, die von Kopernikus, Galilei und Newton begründet wurde.
- II Die Veränderungen durch die galileisch-newtonsche Physik bestanden zu Anfang nicht in der Erschließung neuer Erfahrungsbereiche oder in der Produktion neuer Ideen, sondern in einer neuen Sichtweise bekannter Phänomene und im Denken, bzw. Denkbarmachen bisher verworfener Ideen.
- III Der wichtigste Fortschritt der galileisch-newtonschen Physik besteht in der Befreiung des Denkens von der Beherrschung durch die unmittelbare, sinnliche Erfahrung. Für die neue Physik liegt die eigentliche Ordnung der Dinge hinter den wahrnehmbaren Phänomenen verborgen. Die wahre Realität ist eine Welt idealer Gestalten. Die wahrnehmbaren und meßbaren Phänomene sind unvollkommene Repräsentanten der wahren Weltordnung.
- IV Der Zugang zur wahren Realität, d.h. zu den idealen Gestalten, ist nur über den Weg der Ideation möglich. Dieser besteht in der gedanklichen Konstruktion reiner Phänomene. In der "Anfaß- und Vorzeigerealität" sind ideale Gestalten nicht auffindbar. Sie können mittels Realisationshandlungen nur näherungsweise geschaffen werden.
- V In der galileisch-newtonschen Physik erhält die Mathematik einen neuen Stellenwert. Sie wird als einzig adäquates Mittel zur Beschreibung der Natur betrachtet.
- VI Der Übergang ist begleitet von einem Wechsel der Intention. Im Vordergrund des Interesses stehen fortan Fragen nach funktionalen Beschreibungen von Phänomenen, nach dem Wie. Fragen nach den letzten Ursachen des Naturgeschehens und nach den Zwecken, also die Fragen nach dem Warum und dem Wozu, treten zurück.
- VII Die Schwierigkeiten von Schülern beim Lernen von Physik liegen z.T. darin begründet, daß sie den Übergang von einer aristotelischen zu einer galileisch-newtonschen Natursicht nicht vollzogen haben und die neue Vorgehensweise der Physik nicht verstehen, bzw. ihren Sinn bezweifeln.

D.3.3 Die neue Erkenntnisweise der galileisch-newtonschen Physik

Wir wenden uns bei der Diskussion des Übergangs zunächst den Thesen II und III zu und diskutieren sie an Zitaten von Aristoteles, die im Zusammenhang mit seiner Argumentation gegen das Vakuum stehen. Aristoteles begründet darin seine Ablehnung des leeren Raumes anhand der "absurden" Bewegungsformen, die Körper im Vakuum vollzögen. Absurd sind sie für ihn deshalb, weil die Wahrnehmung etwas anderes zeigt, nämlich, daß alle Bewegungen nach einem endlichen Zeitraum zur Ruhe kommen und daß verschieden schwere Körper unterschiedliche Fallzeiten haben. Aristoteles kommt beim Durchdenken der Bewegungen im Leeren genau zu den Ergebnissen, die Galilei und Newton später als die idealen Bewegungsformen (freier Fall im Vakuum, Trägheitsbewegung) zur eigentlichen Realität hinter der sinnlichen Wahrnehmung erheben und die sie zum Gegenstand funktionaler Beschreibungen machen. Aristoteles lehnt diese Bewegungsformen jedoch als absurd ab, da sie nirgends beobachtet werden können.

Diejenigen nun, die meinen, das Leere müsse notwendigerweise existieren, wenn eine Bewegung zustandekommen soll, gelangen in Wirklichkeit zu der entgegengesetzten Folgerung, wenn man die Dinge genau prüft; da zeigt es sich nämlich, daß nicht die geringste Bewegung möglich ist, wenn das Leere existiert.
(Aristoteles nach Samburski 1978, 102)

Niemand (wäre) in der Lage, einen Grund anzugeben, weshalb dasjenige, was in Bewegung gesetzt worden ist, irgendwo einmal stehenbleiben sollte. Denn wieso sollte dies eher hier als dort geschehen? Also wird alles entweder immer in Ruhe bleiben oder notwendigerweise ins Unbegrenzte weiterbewegt werden, es sei denn, daß etwas Stärkeres hindernd dazwischenträte. (103)

Was nun die Verschiedenheit der bewegten Körper selbst betrifft, so geschieht folgendes: wir sehen, daß diejenigen Körper, die eine größere Schwere oder Leichtigkeit besitzen, dieselbe Strecke (nach unten oder nach oben) schneller durchlaufen, wenn alle übrigen Verhältnisse dieselben sind, und zwar in dem selben Verhältnis, in dem sich ihre Größen zueinander verhalten. Das müßte nun auch für das Leere gelten. Doch dies ist unmöglich. Denn aus welchem Grund sollte sich der eine Körper schneller bewegen als der andere? In einem vollen Medium geschieht dergleichen notwendigerweise. Denn das Größere zerteilt mit seiner Wucht das Medium schneller. (...) Im Leeren wird demnach alles dieselbe Geschwindigkeit haben; und dies stimmt offensichtlich nicht. (104)

Die Schlußfolgerungen von Aristoteles "Also wird alles entweder in Ruhe bleiben oder notwendigerweise ins Unbegrenzte weiterbewegt werden" und "Im Leeren wird demnach alles dieselbe (Fall-) Geschwindigkeit haben" sind die gleichen, die Galilei später als zentrale Aussagen der "Neuen Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend" (Untertitel der Discorsi) bezüglich der Bewegungen von Körpern herausstellt. Für Aristoteles dienen sie gerade im Gegenteil

der Widerlegung des Vakuums, denn es "stimmt offensichtlich nicht", daß die Fallbewegung unterschiedlich schwerer Körper gleich ist. Es kann deshalb nicht stimmen, weil die Erfahrung das Gegenteil lehrt.

Aristoteles Naturzugang ist kontemplativer Art. Aktive Eingriffe in das Naturgeschehen tragen für ihn nicht zum Erfassen des wahren Wesens der Natur bei. Das bedeutet nicht, daß die aristotelische Physik auf freier Spekulation beruht. Bei Aristoteles spielt Erfahrung eine andere, aber ebenso wichtige Rolle wie in der galileisch-newtonschen Physik.

Für die aristotelische Physik ist Erfahrung nur das, was der passive Beobachter an der sich selbst überlassenen Natur wahrnimmt. Wenn der Mensch aktiv in das Geschehen der Natur eingreift, kann er über die Natur nichts erfahren.
(Heidelberger 1981, 31)

Wir haben weiter oben festgestellt, daß die aristotelische Physik der Alltagserfahrung näher ist als die galileisch-newtonsche. Sie nimmt die Natur so wie sie ist - besser gesagt, so wie sie dem unbewaffneten Auge erscheint.

Genauso falsch wie die Behauptung, die aristotelische Physik beruhe rein auf philosophischer Spekulation, ist die These, die leider immer noch in Lehrbüchern zu finden ist, Galilei habe seine Erkenntnisse durch experimentelle "Befragung der Natur" gewonnen.

Richtig ist: Galilei hat die Anfangsgründe der Bewegungslehre und damit die Anfangsgründe der neuzeitlichen Physik geschaffen. (...) Nicht durch Experimente, nicht durch eine "Befragung der Natur" ist die "Nuova Scienza" entstanden. Galilei hat die neuzeitliche Naturwissenschaft durch eine intellektuelle Analyse begründet, durch eine Abstraktion von der Natürlichkeit. (...) Bevor überhaupt erst sinnvoll experimentiert werden kann, müssen durch einen geistigen Prozeß die sogenannten idealen Versuchsbedingungen erschlossen werden. Die intellektuelle Analyse aber ist der entscheidende erste Schritt.
(Hermann 1983, 9)

Die "idealen Versuchsbedingungen" darf man nicht verwechseln mit idealen Gestalten. Diese, z.B. die gleichförmig beschleunigte Bewegung, sind gedankliche Konstrukte. Jeder Realisierungsversuch kann nur eine Annäherung an den idealen Fall darstellen. Optimale Versuchsbedingungen liegen dann vor, wenn die realisierte Bewegung dem angestrebten Ideal möglichst nahe kommt. Welcherart die "idealen" Versuchsbedingungen sein müssen, ergibt sich aus der gedanklichen Konstruktion der idealen Gestalt. Man hätte allein durch genaue Messungen nie das Fallgesetz $s = 1/2 \cdot g \cdot t^2$ gefunden - schon gar nicht mit den Meßmethoden von Galilei.

Das Neue der galileisch-newtonschen Physik besteht in der Überzeugung, daß die wahre Realität hinter den Erscheinungen der Natur zu suchen ist. Im 16. und 17. Jahrhundert rang sich die Naturwissenschaft zu der Einsicht durch,

daß es nicht so sehr die unmittelbare, selbstverständliche, durch die Sinne zugängliche Erfahrung dieser Wirklichkeit ist, welche den Weg zur Erfassung ihrer inneren Ordnung und Gesetzmäßigkeit eröffnet, sondern der theoretische, mit abstrakten Begriffen arbeitende Verstand, der auch der sinnfälligen Anschauung und Erfahrung Gewalt anzutun vermag.

(Simonis 1974, 169)

Es sei einfach nicht zutreffend, schreibt Blumenberg (1980, 38f), daß ein Mehr an Erfahrung zur Überwindung der aristotelischen Physik geführt habe. Die Art von Erfahrung, die zum Bruch mit dem Aristotelismus geführt habe, sei eine auf bestimmte Prämissen abgestellte, nach ihnen ausgewählte und eingerichtete, unter definierte Bedingungen gestellte Erfahrung. Diese Art von Erfahrung biete sich nie unmittelbar dar und erschöpfe sich nicht in anschaulicher Gegebenheit. Am Anfang stehe vielmehr die Distanzierung von unserer alltäglichen Erfahrung als solcher, der Verdacht, daß diese uns mit unseren Selbstverständlichkeiten beliefernde Erfahrung weder die normale noch die totale physische Wirklichkeit darbiete, daß sie partiell und provinziell sei und daß die einfachen Gesetzmäßigkeiten in ihr durch zusätzliche Faktoren verdeckt seien.

Der Übergang von der aristotelischen zur galileisch-newtonschen Physik ist wissenschaftssystematisch ein tiefer Einschnitt (These I). Wissenschaftshistorisch gab es vermittelnde Zwischenschritte und Traditionen. Galilei konnte auf das Gedankengut der Griechen, Araber und der Impetustheoretiker des 13. und 14. Jahrhunderts zurückgreifen. Spuren der Impetustheorie finden sich besonders in Galileis frühen Schriften. Der Ansatz, die Welt nach Zahlen und geometrischen Figuren zu ordnen, geht auf Pythagoras und Platon zurück. Bacon brachte das Experiment als Mittel zur Naturerkenntnis ein. Die scholastische Impetustheorie verschwand 150 Jahre vor Galilei in der Bedeutungslosigkeit. Eine kontinuierliche, über die Impetustheorie vermittelte Entwicklung von Aristoteles zu Galilei ist nicht auszumachen (vgl. Crombie 1977, 344). An den Universitäten dominierte das Studium der Aristotelischen Werke vom 12. Jahrhundert bis zur Renaissance.

Einen direkten Eindruck von Galileis Methode der Gewinnung von Aussagen über die Natur wollen wir im folgenden Exkurs anhand kommentierter Auszüge aus den 'Discorsi' (Galilei 1637) vermitteln. Gegenstand sind die Bewegungsformen und der freie Fall. Für den Wissenschaftshistoriker Armin Hermann repräsentieren die 'Discorsi' den Beginn der klassischen Physik (Hermann 1978, 118).

D.3.4 Exkurs: Galileis Bewegungslehre und die Beschreibung des freien Falls

1. Galileis Bewegungslehre

Den dritten Tag der Discorsi, in dem er die Grundlagen der neuen Kinematik formuliert, leitet Galilei folgendermaßen ein:

Dritter Tag

Ueber die örtliche Bewegung.

Ueber einen sehr alten Gegenstand bringen wir eine ganz neue Wissenschaft. Nichts ist älter in der Natur als die Bewegung, und über dieselbe giebt es weder wenig noch geringe Schriften der Philosophen. Dennoch habe ich deren Eigenthümlichkeiten in grosser Menge und darunter sehr wissenswerthe, bisher aber nicht erkannte und noch nicht bewiesene in Erfahrung gebracht. Einige leichtere Sätze hört man nennen: wie zum Beispiel, dass die natürliche Bewegung fallender schwerer Körper eine stetig beschleunigte sei. In welchem Masse aber diese Beschleunigung stattfindet, ist bisher nicht ausgesprochen worden; denn so viel ich weiss, hat Niemand bewiesen, dass die vom fallenden Körper in gleichen Zeiten zurückgelegten Strecken sich zu einander verhalten wie die ungeraden Zahlen. Man hat beobachtet, dass Wurfgeschosse eine gewisse Curve beschreiben; dass letztere aber eine Parabel sei, hat Niemand gelehrt. Dass aber dieses sich so verhält und noch vieles andere, nicht minder Wissenswerthe, soll von mir bewiesen werden, und was noch zu thun übrig bleibt, zu dem wird die Bahn geebnet, zur Errichtung einer sehr weiten, ausserordentlich wichtigen Wissenschaft, deren Anfangsgründe diese vorliegende Arbeit bringen soll, in deren tiefere Geheimnisse einzudringen Geistern vorbehalten bleibt, die mir überlegen sind.
(Galilei 1637, 149f)

Die Vorstellung, "dass die natürliche Bewegung fallender Körper eine stetig beschleunigte sei", war durchaus nicht selbstverständlich. Es geht aus dem "aristotelischen Fallgesetz" nicht eindeutig hervor, ob damit konstante Fallgeschwindigkeiten fallender Körper in Medien beschrieben werden oder ob nicht lediglich die Fallzeit, unabhängig von den Bewegungsformen gleichförmig, beschleunigt oder gemischt beschleunigt-gleichförmig, gemeint ist.

Zwar hatte sich im Mittelalter die Erkenntnis durchgesetzt, daß der freie Fall in Luft eine beschleunigte Bewegung ist (vgl. unsere Ausführungen zur Impetustheorie), doch setzte sich der Parameter Zeit für die erreichte Geschwindigkeit erst langsam durch. Lange Zeit wurde ein Zusammenhang von Fallgeschwindigkeit und Fallstrecke diskutiert. Galileis großer Verdienst war es, die Zeit zum durchgängigen Parameter in den Bewegungsgleichungen zu machen. Wodurch Galilei dazu kam, kann nicht genau festgemacht werden. Arens (1981) stellt einen Zusammenhang zwischen dem Aufkommen des Parameters Zeit in den Bewegungslehren und der wachsenden Bedeutung der Zeitregelung für die Organisation des Lebens in den aufstrebenden Städten und dem sich verfeinern-

den Uhrenbau her. Entscheidend für die Verbreitung der Uhr sei das gesellschaftliche Bedürfnis nach einer rationalen Regelung des Zusammenlebens und -wirtschaftens in den rapide wachsenden Städten gewesen. Dies habe einen allgemeinen Bewußtseinswandel mit sich gebracht und zur Ablösung des Ortes als Bewegungsparameter durch die Zeit beigetragen (vgl. Arens 1981, VIII).

Der Satz, "dass die von fallenden Körpern in gleichen Zeiten zurückgelegten Strecken sich zueinander verhalten wie die ungeraden Zahlen", ist Galileis griffige Formulierung der Beziehung $s \propto t^2$.

Seine systematischen Ausführungen zur Kinematik beginnt Galilei mit der Definition der gleichförmigen Bewegung.

Definition.

Ich nenne diejenige Bewegung gleichförmig, bei welcher die in irgend welchen gleichen Zeiten vom Körper zurückgelegten Strecken unter einander gleich sind. (S. 141)

Die Betonung liegt auf "irgend welchen gleichen Zeiten". Galilei erläutert:

Erläuterung

Der althergebrachten Definition (welche einfach von gleichen Strecken in gleichen Zeiten sprach) haben wir das Wort "irgend welchen" hinzugefügt, d.h. zu jedweden gleichen Zeiten: denn es wäre möglich, dass in gewissen Zeiten gleiche Strecken, dagegen in kleineren gleichen Theilen dieser selben Zeiten ungleiche Strecken zurückgelegt werden. (S. 141)

Der Begriff "Geschwindigkeit" wird nicht gesondert eingeführt, sondern einfach verwendet, offensichtlich als Proportionalitätskonstante im Sinne unserer heutigen Schreibweise $s = c \cdot t$. Aus Definition und Erläuterung geht hervor, daß Galilei klar zwischen Durchschnittsgeschwindigkeit und Momentangeschwindigkeit differenziert und auf eine differentielle Definition der Geschwindigkeit abzielt.

Galilei verwendet keinerlei algebraische Formulierungen. Er beschreibt alle Beziehungen zwischen Größen über geometrische Proportionen. Galilei sah, wie allgemein die Mathematik im 17. Jahrhundert, die Geometrie als der Algebra überlegen an. Dies macht seine Beweisführungen für uns, die wir die Gleichungsschreibweise gewohnt sind, manchmal schwer nachvollziehbar. Ich habe an einigen Stellen Übersetzungen in die heute übliche Schreibweise angefügt.

Nach einer kurzen Diskussion der gleichförmigen Bewegung erfolgt die ausführliche Behandlung der "natürlich beschleunigten Bewegung". Galilei erklärt den freien Fall zum Paradigma seiner Betrachtungen.

Wir (haben) uns entschlossen, diejenigen Erscheinungen zu betrachten, die bei den frei fallenden Körpern in der Natur vorkommen und lassen

die Definition der beschleunigten Bewegung zusammenfallen mit dem Wesen einer natürlich beschleunigten Bewegung. (S. 147)

Ausgangspunkt der Untersuchung der "natürlich" beschleunigten Bewegung ist nun keineswegs ein Fallexperiment, sondern eine grundlegende Annahme über die Art des Geschwindigkeitszuwachses, die Galilei aus dem Prinzip ableitet, für eine physikalische Beziehung, wenn keine guten Gründe dagegen sprechen, zunächst die einfachste Form anzusetzen.

Wenn ich daher bemerke, dass ein aus der Ruhelage von bedeutender Höhe herabfallender Stein nach und nach neue Zuwüchse an Geschwindigkeit erlangt, warum soll ich nicht glauben, dass solche Zuwüchse in allereinfachster, Jedermann plausibler Weise zu Stande kommen? Wenn wir genau aufmerken, werden wir keinen Zuwachs einfacher finden, als denjenigen, der in immer gleicher Weise hinzutritt. (S. 147)

Analog zur Definition der gleichförmigen Bewegung definiert Galilei:

Die gleichförmig oder einförmig beschleunigte Bewegung ist eine solche, bei welcher in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeiten hinzukommen. (S. 155)

In der Definition erscheint die Zeit als Parameter. Der Weg wird von Galilei als Parameter verworfen, da er angeblich zu absurden Ergebnissen führen würde. Tatsächlich hat Galilei selbst, wie aus Briefen hervorgeht, eine Zeitlang mit der Vorstellung 'Fallgeschwindigkeit prop. zur Fallstrecke' gearbeitet. Leonardo da Vinci und andere waren ebenfalls von der Wegabhängigkeit der Fallgeschwindigkeit ausgegangen. Wir verzichten auf das Originalzitat aus den Discorsi. Pukies (1979, 142) hat Galileis Argumentation in für uns verständlichere Form übertragen.

Aus der Definition $a = \Delta v / \Delta s$ folgt: $v \sim s$. Bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung, z.B. bei einem fallenden Körper, ist v zu Beginn des Falls ($s = 0$) 0. Beim Fall von einer Weiteinheit ($s = 1$) sei die Geschwindigkeit v_1 , bei $s = 2$ ist sie dann laut Definition $v_2 = 2 v_1$, bei $v_3 = 3 v_1$ usw. Da für eine gleichförmig beschleunigte Bewegung weiter gilt $v_D = (v_E + v_A)/2$, wobei hier $v_A = 0$ (v_D = Durchschnitts-, v_E = End-, v_A = Anfangsgeschwindigkeit), gilt für die Fallzeiten

$$t_1 = s_1 / v_D = 1 / (1/2 v_1) = 2 / v_1$$

$$t_2 = s_2 / v_D = 2 / (2/2 v_1) = 2 / v_1$$

$$t_3 = s_3 / v_D = 3 / (3/2 v_1) = 2 / v_1$$

Daraus folgt $t_1 = t_2 = t_3$

Das heißt: Der Körper fällt die doppelte und dreifache Strecke genau so schnell wie die einfache. Dies ist aber offensichtlich Unsinn, also kann die Definition $a = \Delta v / \Delta s$ nicht richtig sein.

Galileis "Widerlegung" ist nicht stichhaltig. Galilei setzt die aus wegabhängigen Geschwindigkeiten errechnete Durchschnittsgeschwindigkeit v_D in eine Gleichung ($t_x = s_x/v_{Dx}$) ein, die nur für zeitabhängige Durchschnittsgeschwindigkeiten bei einem Zusammenhang $dv/dt = \text{const.}$ zulässig ist. Nur bei $v(t) = a \cdot t$ kann mit $v_D = (v_E + v_A)/2 = v(t_E + t_A)/2$ t_x über s_x/v_{Dx} berechnet werden. Die Durchschnittsgeschwindigkeit v_D wird jedoch bei Galileis Ableitung nicht zur Mitte des Zeitintervalls sondern zur Mitte des Wegintervalls erreicht. Galilei beweist lediglich, daß $dv/dx = \text{const.}$ und $v_D = (v_E + v_A)/2$ sich widersprechen. Galileis Irrtum beruht darauf, daß er die von ihm selbst eingeführte Unterscheidung von Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit nicht konsequent anwendet. Die eigentlichen Probleme der Festlegung $a = dv/ds$ liegen woanders, wie die folgende Ableitung zeigen wird.

$$a = dv/ds$$

bei $a = \text{const.}$:

$$v = a \cdot s$$

mit $v = ds/dt$:

$$ds/dt = a \cdot s \Rightarrow s(t) = c e^{at}$$

$$s(t=0) = c = s_0$$

$$s(t) = s_0 e^{at} \quad (I)$$

$$v(t) = ds(t)/dt = s_0 a e^{at}$$

$$v(t=0) = s_0 \cdot a = v_0$$

$$v(t) = v_0 e^{at} \quad (II)$$

aus (II) folgt bei $v_0 = 0$:

$$v(t) = \text{const.} = 0$$

aus (I) folgt:

$$t_x = (\ln s_x - \ln s_0)/a \quad (\text{vgl. mit Galileis } t_x = s_x/v_{Dx})$$

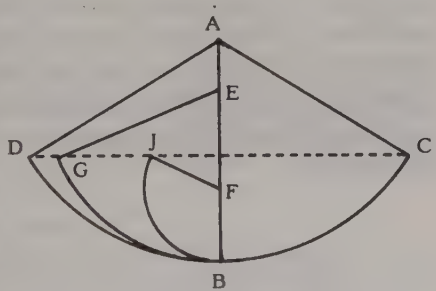
Das eigentliche Problem liegt also darin, daß der Körper bei einer Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 0$ gar nicht zu fallen beginnt. Er behält für alle Zeiten die Geschwindigkeit 0. Zudem sind die Gesetze zur gleichförmig beschleunigten Bewegung nicht invariant gegen Galilei-Transformationen.

Die Definition der gleichförmig beschleunigten Bewegung wird von Galilei vollständig aus theoretisch-spekulativen Überlegungen auf der Grundlage von allgemeinen Prinzipien ("Einfachheit") und Analogie entwickelt: "Denn wie die Gleichförmigkeit der Bewegung durch die Gleichheit der Zeiten und Räume bestimmt und erfasst wird ..., so können wir durch ebensolche Gleichheit der Zeittheile die Geschwindigkeitszunahme als einfach zu Stande gekommen erfassen" (S. 147). Experimentelle Untersuchungen liegen noch in weiter Ferne. Galilei muß dafür, um genügend große und damit meßbare Zeiten zu erhalten, den freien Fall auf die schiefe Ebene übertragen und aus seinen Definitionen empirisch überprüfbare Vorhersagen ableiten.

Das wesentliche Argument für die Übertragbarkeit der Bewegungsform des freien Falls auf die schiefe Ebene liegt in folgender Aussage:

Die Geschwindigkeitswerthe, welche ein und derselbe Körper bei verschiedenen Neigungen einer Ebene erlangt, sind einander gleich, wenn die Höhen dieser Ebenen einander gleich sind. (S. 155)

Der Beleg erfolgt anhand des Phänomens, daß ein Pendel, das man von Punkt C aus vor einer Wand schwingen läßt, stets wieder auf die Höhe der Horizontalen DC hinaufschwingt, auch wenn man in E oder F Nägel einschlägt (Galileische Hemmungspendel). Galilei macht für die Überwindung des Anstiegs von B aus (BD, BG oder BJ) die auf dem Fall längs CB erlangte Geschwindigkeit der Kugel verantwortlich. Da andererseits



der Pendelkörper nach dem Fallen entlang der Bögen DB, GB und JB ebenfalls wieder auf die Höhe DC hinaufschwingt, seien die "beim Fallen erzeugten Momente" unabhängig vom Bogen und nur abhängig von der Höhe. (Hinsichtlich der Begriffe Impuls, Moment oder Energie besteht bei Galilei keine begriffliche Eindeutigkeit, die auf systematisch unterschiedliche Bedeutungen schließen ließe.)

Galilei wollte die Argumentation als Plausibilitätsbegründung verstanden wissen, die "fast einem zwingenden Beweis" entspräche. Vom Fall auf dem Kreis (unabhängig vom Bogen) extrapoliert Galilei auf die Unabhängigkeit der Endgeschwindigkeit von der Neigung einer schiefen Ebene bei konstanter Höhe. Dabei nimmt er an, daß die Geschwindigkeiten, die Walzen "vollkommenster Rundung" beim Abrollen von einer schiefen Ebene "frei von jeder Rauhgkeit" erreichen, mit

der beim freien Fall von gleicher Höhe erzielten übereinstimmen. Galilei vernachlässigt (aus heutiger Sicht) den Anteil der potentiellen Energie, der in Rotationsenergie umgewandelt wird. Ferner kommen die Rollen ab bestimmten großen Neigungswinkeln ins Rutschen.

Für die spätere experimentelle Überprüfung seiner Vorhersagen ist dies jedoch nicht entscheidend, da Galilei offensichtlich nur Neigungswinkel unter 10° realisiert hat (entgegen seinem Anspruch, Aussagen für "beliebige Winkel" zu machen). Einen Vergleich der Endgeschwindigkeiten beim freien Fall, bzw. beim Rollen auf einer schiefen Ebene konnte er aus meßtechnischen Gründen ohnehin nicht vornehmen.

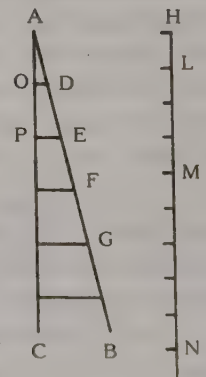
Als nächstes muß Galilei aus seiner Definition der gleichförmig beschleunigten Bewegung eine empirisch überprüfbare Folgerung ableiten. Dafür verwendet er den bereits vor ihm bekannten Mittelwertsatz über die Durchschnittsgeschwindigkeit bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung ($v_D = 1/2 v_{\text{End}}$ bei $v_{\text{Anf.}} = 0$). Der Satz war vor Galilei nie so konsequent für Vorhersagen von Bewegungsverläufen genutzt worden.

Wir wollen den Gedankengang, der Galilei zu dem Ergebnis führt, daß bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung die in gleichen Zeiten zurückgelegten Strecken sich zueinander verhalten wie die ungeraden Zahlen, im einzelnen verfolgen. Die Ableitung ist idealtypisch für Galileis Argumentations- und Darstellungsweise. Parallel dazu übersetzen wir die einzelnen Schritte in unsere heutige Schreibweise.

Theorem II. Propos. II

"Wenn ein Körper von der Ruhelage aus gleichförmig beschleunigt fällt, so verhalten sich die in gewissen Zeiten zurückgelegten Strecken wie die Quadrate der Zeiten."

Man stelle den Verlauf der Zeit von einem Augenblick A an dar durch die Linie AB, in welcher zwei Theilchen AD, AE gedacht werden mögen; sei ferner HJ die Strecke, die der Körper aus der Ruhelage H zurücklegt mit gleichförmiger Beschleunigung; sei ferner HL zurückgelegt im ersten Zeittheilchen AD, dagegen HM in der Zeit AE. Ich behaupte, MH verhalte sich zur Strecke HL wie die Quadrate der Zeiten AE und AD. Man verzeichne AC unter irgend einem Winkel geneigt gegen AB; aus den Punkten D, E ziehe man Parallelen DO, EP, und sei DO die Endgeschwindigkeit im Augenblick D; desgleichen PE die Endgeschwindigkeit im Augenblick E am Ende der Zeit AE. (S. 159)



Unsere Übersetzung:

Auf dem Strahl I sind die Fallzeiten t_1 und t_2 abgetragen ($t_2 = 2 t_1$).

Auf dem Strahl II finden sich die entsprechenden Fallstrecken s_1 und s_2 .

Unter einem beliebigen Winkel ist gegen I ein weiterer Strahl III aufgetragen. Die Parallelenabschnitte entsprechen den Geschwindigkeiten v_1 und v_2 ($v_2 = 2 v_1$).

Der Winkel α entspricht unserer Proportionalitätskonstanten a (Beschleunigung):

$$v = a \cdot t$$

(Galilei hat ja keine Beschleunigung definiert, sondern nur festgehalten, daß bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung gilt $v_1/v_2 = t_1/t_2$.)

Weiter bei Galilei:

Da oben bewiesen worden ist, dass die zurückgelegten Strecken bei gleichförmig beschleunigter Bewegung und bei gleichförmiger Bewegung mit halber Endgeschwindigkeit gleich sind, so ist klar, dass die Strecken MH, LH ebenso gross sind, wie sie bei gleichförmiger Bewegung mit Geschwindigkeiten $1/2$ PE und $1/2$ OD in Zeiten EA, DA zurückgelegt worden wären. (S. 159)

$$s_1 = 1/2 v_1 \cdot t_1$$

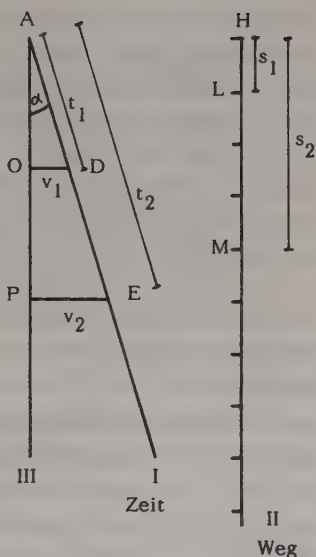
$$s_2 = 1/2 v_2 \cdot t_2$$

Wenn man nun zeigen könnte, dass diese Strecken MH, LH sich verhalten wie die Quadrate von EA, DA, so ist der Satz bewiesen. Aber im vierten Satz des ersten Buches ward gezeigt, dass bei gleichförmiger Bewegung die Strecken ein zusammengesetztes Verhältniss haben aus dem Verhältniss der Geschwindigkeiten und dem Verhältniss der Zeiten: hier aber verhalten sich die Geschwindigkeiten wie die Zeiten (denn wie $1/2$ PE zu $1/2$ OD, oder wie PE zu OD, so verhält sich AE zu AD) folglich verhalten sich die Strecken wie die Quadrate der Zeiten, w.z.b.w. (S. 159f)

$$s_2/s_1 = (1/2 v_2)/(1/2 v_1) \cdot t_2/t_1$$

$$\text{mit } v_2/v_1 = t_2/t_1 :$$

$$s_2/s_1 = t_2^2/t_1^2 \quad \text{w.z.b.w.}$$



Daraus leitet Galilei nun seine berühmte Formulierung ab, daß sich die in gleichen Zeiten zurückgelegten Strecken wie die ungeraden Zahlen verhalten.

Aus dem Vorhergehenden folgt, dass, wenn vom Anfangspunkte der Bewegung an gleiche Zeitgrößen genommen werden, wie AD, DE, EF, FG, in denen die Fallstrecken HL, LM, MN, NJ zurückgelegt werden, die letzteren sich wie die Reihe der ungeraden Zahlen, also wie 1, 3, 5, 7 verhalten. Denn so gross ist das Verhältnis der Excesse der Quadrate von Linien, die gleichviel von einander differiren, und deren Zuwächse gleich sind der kleinsten aller Linien: mit anderen Worten, der Unterschied der Quadrate aller Zahlen von 1 an. Während also die Geschwindigkeit wie die einfache Zahlenreihe in gleichen Zeiten anwächst, werden die in diesen einzelnen Zeiten zurückgelegten Strecken wie die Reihe der ungeraden Zahlen sich verhalten. (S. 160)

Wenn sich die Zeiten verhalten wie $1 : 2 : 3 : 4$, dann verhalten sich die zurückgelegten Wege wie $1 : 4 : 9 : 16$ und die "Excesse" oder Zuwächse der Wege wie $1 : 3 : 5 : 7$.

Erst nachdem Galilei seine Überlegungen bis zu diesem Punkt entwickelt hat, führt er ein Experiment an, das seine Definition der gleichförmig beschleunigten Bewegung verifizieren soll. Das angeführte Experiment ist als Realisationshandlung zu werten, mittels derer Galilei den Zusammenhang $s \propto t^2$ in die Natur hineinarbeitet. Zweifellos hat es Galilei viel Mühe gekostet, den Versuch zu der Reife zu bringen, die ihn geeignet erscheinen ließ, seine theoretischen Ausführungen zu bestätigen. In der unberührten Natur gibt es keine vergleichbaren Vorgänge, die als Vorbild hätten dienen können. Salviati, der im Dreier-Diskurs die Lehren Galileis (des "Autors") verkündet, berichtet:

Der Autor hat es nicht unterlassen, Versuche anzustellen, und um mich davon zu überzeugen, dass die gleichförmig beschleunigte Bewegung in oben geschildertem Verhältnis vor sich gehe, bin ich wiederholt in Gemeinschaft mit unserem Autor in folgender Weise vorgegangen:

Auf einem Lineale, oder sagen wir auf einem Holzbrette von 12 Ellen Länge, bei einer halben Elle Breite und drei Zoll Dicke, war auf dieser letzten schmalen Seite eine Rinne von etwas mehr als einem Zoll Breite eingegraben. Dieselbe war sehr gerade gezogen, und um die Fläche recht glatt zu haben, war inwendig ein sehr glattes Pergament aufgeklebt; in dieser Rinne liess man eine sehr harte, völlig runde und glattpolirte Messingkugel laufen. Nach Aufstellung des Brettes wurde dasselbe einerseits gehoben, bald eine, bald zwei Ellen hoch; dann liess man die Kugel durch den Kanal fallen und verzeichnete in sogleich zu beschreibender Weise die Fallzeit für die ganze Strecke: häufig wiederholten wir den einzigen Versuch, zur genauen Ermittlung der Zeit, und fanden gar keine Unterschiede, auch nicht einmal von einem Zehnteil eines Pulsschlages. Darauf liessen wir die Kugel nur durch ein Viertel der Strecke laufen, und fanden stets genau die halbe Fallzeit gegen früher. Dann wählten wir andere Strecken, und verglichen die gemessene Fallzeit mit der zuletzt erhaltenen und mit denen von $2/3$ oder $3/4$ oder irgend anderen Bruchtheilen; bei wohl hundertfacher Wiederholung fanden wir stets, dass die Strecken sich verhielten wie die Quadrate

der Zeiten; und dieses zwar für jedwede Neigung der Ebene, d.h. des Kanals, in dem die Kugel lief. (S. 163)

So ausführlich findet sich in den Discorsi keine andere Versuchsbeschreibung. Das belegt die Bedeutung, die Galilei den Fallrinnenexperimenten zumißt. Galilei hat diesen Versuch zweifellos selbst durchgeführt (was man bei andern von ihm geschilderten Experimenten bezweifeln darf). Dennoch kann sein Bericht nicht ganz stimmen. Die Aussage "fanden wir stets, dass die Strecken sich verhielten wie die Quadrate der Zeiten und dieses zwar für jedwede Neigung der Ebene" muß aus zwei Gründen in Zweifel gezogen werden: In einer Nachbildung des historischen Experiments wurde festgestellt, daß bei Neigungswinkeln über 6° die Fallzeiten so kurz werden, daß sie mit den damals zur Verfügung stehenden Mitteln nicht mehr genügend exakt gemessen werden konnten. Zum anderen rutschen die Kugeln in der glatten Rinne ab bestimmten großen Winkeln, so daß durch den Wegfall der Rotationsenergie die Translationsgeschwindigkeit steigt. Experimente mit gleitenden Eisblöcken oder ähnlichem hat Galilei nicht gemacht (vgl. Holton 1970, 46ff). Galilei gibt keine Originalmeßdaten an.

Die von Galilei realisierbaren kleinen Neigungswinkel machen eine Verallgemeinerung der Beziehung $s \propto t^2$ auf beliebige Winkel und gar auf den freien Fall empirisch problematisch. Galilei umgeht diese Schwierigkeit durch Verschweigen der genauen Winkelwerte. Er hätte (und hat vermutlich auch) festgestellte Abweichungen auf Unvollkommenheiten der Versuchsbedingungen zurückführen können. Real ist die Forderung nach einer ideal runden Kugel und einer ideal glatten Ebene nie zu erfüllen.

Versuche spielen bei Galilei nicht die Rolle, die ihnen oft zugeschrieben wird. Er hat keineswegs aus tatsächlichen Fallexperimenten die Beschreibung der gleichförmig beschleunigten Bewegung abgeleitet. Solchen Behauptungen liegt ein falsch verstandener Induktivismus zugrunde. Ausgangspunkt der Theoriebildung sind theoretisch-spekulative Naturentwürfe. Daraus deduziert Galilei teilweise auf verschlungenen Wegen und über Plausibilitätsbetrachtungen Voraussagen, die er dann mit Experimenten untermauert, die nach den Erfordernissen der theoretischen Entwürfe gestaltet werden ("vollständig ebene Flächen", "vollkommen runde Körper", "ohne jegliche zufälligen Hindernisse" usw.). Dabei sind die Berichte über den Ausgang der Experimente mit Vorsicht zu genießen. Bei manchen Versuchen kann man davon ausgehen, daß Galilei sie nie tatsächlich durchgeführt hat. Es hält das reale Experiment bei erdrückender theoretischer Evidenz seines Ausgangs auch nicht für erforderlich. So läßt er Salviati im "Dialog über die Weltsysteme" sagen: "Ich bin ohne Versuch gewiß, daß das Ergebnis so ausfällt, wie ich Euch sage, denn es muß so ausfallen". (Der Satz

bezieht sich auf die Vorhersage, daß ein Stein, den man von der Mastspitze eines fahrenden Schiffes fallen läßt am Fußpunkt des Mastes auftrifft.)

Der Fortschritt, den Galilei für die Naturwissenschaften bewirkt hat, liegt nicht so sehr im Einbeziehen des Experiments in den Theoriefindungsprozeß. Hier dominieren die theoretisch-spekulativen Entwürfe. Galilei hat das Experiment in den Theoriedarstellungsprozeß eingearbeitet. Experimentieren bedeutet seit Galilei in der Physik Realität schaffen.

Der wesentliche Schritt, den Galilei tat, und der weit über die Wissenschaft der Griechen und auch über Kepler und Kopernikus hinausführte, war der praktische Versuch, das postulierte geometrische Wesen der Natur hier unter irdischen Bedingungen experimentell herauszuarbeiten, bzw. wie man richtiger sagen müßte, die Geometrie in die Natur hineinzuarbeiten.
(Gleich 1982, 6)

Galilei erkannte, daß die "Common sense"-Welt der sinnlichen Wahrnehmung nicht unmittelbar Ausgangspunkt für wissenschaftliche Reflexion sein kann. Dafür ist sie zu komplex. Galilei unterlegte den vorfindbaren Erscheinungen einfache Einzeleffekte, analysierte diese getrennt voneinander und fügte sie wieder zusammen. Diese Methode werden wir jetzt bei seinen Ausführungen zur Fallbewegung kennenlernen.

2. Galilei zum freien Fall

Galilei behandelt den freien Fall in den Discorsi unter zwei Aspekten: Zuerst geht es ihm um die Widerlegung des Aristotelischen Fallgesetzes (S. 56 bis 62). Die Erörterungen stehen, wie bei Aristoteles, unter der Überschrift "Vakuum". Ziel Galileis ist der Beweis der Möglichkeit des leeren Raums. Nachdem ihm das gelungen ist, wendet er sich der genauen Betrachtung der Fallbewegung von Körpern in widerstrebenden Medien zu (S. 65 bis 69). Der zweite Teil von Galileis Betrachtungen des freien Falls, die Entwicklung eines eigenen Gesetzes für reale Fallbewegungen, wird in der Literatur oft übergangen (z.B. von Pukies 1979). Man erhält den Eindruck, Galilei sei bei der Aussage stehengeblieben, alle Körper fielen gleich schnell. Es war jedoch durchaus Galileis Bestreben, die realen Fallbewegungen zutreffender zu beschreiben, als Aristoteles das gelungen war.

In den Discorsi referiert Simplicio, der Vertreter des aristotelischen Denkens, das Aristotelische Fallgesetz: Die Sinkgeschwindigkeit eines Körpers ist proportional zu S/D (S: Schwere des Körpers, D: Dichte des Mediums). Diese Darlegungen erfolgen am Ende einer ausführlichen Diskussion über Verdichtung und Verdünnung und die Existenz eines Vakuums. Darauf bezieht sich Simplicios Satz:

Da die Feinheit des Vacuums um ein unendlich kleines Intervall sich unterscheidet von dem körperlich mit allerfeinster Masse erfüllten Raume, so wird jeder Körper, der im erfüllten Medium in einiger Zeit eine gewisse Strecke zurücklegt, im Vacuum sich momentan bewegen; aber eine instantane Bewegung ist unmöglich; mithin ist es unmöglich, dass in Folge der Bewegung ein Vacuum sich bilde. (S. 56)

Hierzu will Galilei den Gegenbeweis antreten. Die Aufstellung eines exakter den beobachtbaren Fallbewegungen angepaßten Gesetzes wäre bei weitem kein so großer Fortschritt gegenüber Aristoteles wie der Beweis der Möglichkeit des Vacuums.

Die Widerlegung der Aristotelischen Vorstellung über das Vakuum erfolgt in zwei Etappen:

a) Zur Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit vom Gewicht des fallenden Körpers

Galilei äußert Zweifel daran, daß Aristoteles sein Fallgesetz je experimentell überprüft hat. (Dies ist auch nicht zu erwarten, wie wir unter Abschnitt A gezeigt haben.) Die Widerlegung erfolgt "ohne viel Versuche" durch Aufdeckung der inneren Widersprüche der Formulierung v prop. S/D. Hier ein längerer Auszug:

Salviati (Salv.): Ohne viel Versuche können wir durch eine kurze, bindende Schlussfolgerung nachweisen, wie unmöglich es sei, dass ein grösseres Gewicht sich schneller bewege, als ein kleineres, wenn beide aus gleichem Stoff bestehen; und überhaupt Herr Simplicio, gebt ihr zu, dass jeder fallende Körper eine von Natur ihm zukommende Geschwindigkeit habe; so dass, wenn dieselbe vermehrt oder vermindert werden soll eine Kraft angewandt werden muss oder ein Hemmnis.

Simplicio (Simpl.): (stimmt dem zu; d. Verf.) (...)

Salv.: Wenn wir zwei Körper haben, deren natürliche Geschwindigkeit verschieden sei, so ist klar, dass, wenn wir den langsameren mit dem geschwindigeren vereinigen, dieser letztere von jenem verzögert werden müsste, und jener, der langsamere, müsste vom schnelleren beschleunigt werden. Seid Ihr hierin mit mir einverstanden?

Simpl.: Mir scheint die Consequenz völlig richtig.

Salv.: Aber wenn dies richtig ist, und wenn es wahr wäre, dass ein grosser Stein sich z.B. mit 8 Maass Geschwindigkeit bewegt, und ein kleiner Stein mit 4 Maass, so würden beide vereinigt eine Geschwindigkeit von weniger als 8 Maass haben müssen, aber die beiden Steine zusammen sind doch grösser, als jener grössere Stein war. (...)

Simpl.: Ich bin ganz verwirrt, denn mir will es nun scheinen, als ob der kleine Stein, dem grösseren zugefügt, dessen Gewicht und daher durchaus auch dessen Geschwindigkeit vermehre. (...)

Salv.: ... Man (muß) hier unterscheiden, ob ein Körper sich bereits bewegt, oder ob er in Ruhe ist. Wenn wir einen Stein auf eine Wagschale thun, so wird das Gewicht durch Hinzufügung eines zweiten Steins vermehrt, ja selbst die Zulage eines Stückes Werch wird das Gewicht um die 6 - 10 Unzen anwachsen lassen, die das Werchstück

hat. Wenn Ihr aber den Stein mitsammt dem Werch von einer grossen Höhe frei herabfallen lasset, glaubt Ihr, dass während der Bewegung das Werch den Stein drücke, und dessen Bewegung beschleunige? (...)

Simpl.: Und wenn der größere Stein auf dem kleineren ruhe?

Salv.: So würde er das Gewicht vermehren müssen, wenn seine Geschwindigkeit überwöge, aber wir fanden schon, dass wenn die kleinere Last langsamer fiele, sie die Geschwindigkeit der grossen vermindern müsste, und mithin die zusammengesetzte Menge weniger rasch sich bewegte, als ein Theil, was gegen Eure Annahme spricht. Lasst uns also feststellen, dass grosse und kleine Körper, von gleichem specifischen Gewicht, mit gleicher Geschwindigkeit sich bewegen.

Gang der Widerlegung:

- i) Aristotelische Annahme: Jeder fallende Körper hat in einem bestimmten Medium eine natürliche Geschwindigkeit.
- ii) Wir nehmen zwei Körper K_1, K_2 mit $v_1(K_1) > v_2(K_2)$ von gleichem spezifischem Gewicht.
- iii) Wenn wir die Körper verbinden, bremst der leichtere Körper K_2 den schwereren Körper K_1 und K_1 beschleunigt K_2 . Es gilt:

$$v(K_1) > v(K_1 + K_2) > v(K_2)$$

Also würde sich der schwerere Körper $K_1 + K_2$ langsamer bewegen als K_1 : Widerspruch zu v prop. S/D.

- iv) Aristotelischer Einwand: Bei Verbindung der Körper fügt K_2 dem Körper K_1 Gewicht zu, so daß sie sich zusammen schneller bewegen.
- v) Galileis Gegenargument: Nur im statischen Fall wird das Gewicht vermehrt (auf einer Waagschale), beim freien Fall drückt der leichtere den schwereren Körper nicht.
- vi) Und wenn der große Stein auf dem kleinen ruht?
- vii) Dann würde der kleine Körper K_2 gleichzeitig K_1 bremsen. In diesem Fall ergibt sich erneut Widerspruch iii).

Galileis Argumentation ist nur dann schlüssig, wenn man die Prämissen akzeptiert, daß jedem Körper eine natürliche Geschwindigkeit zukommt und daß bei der Vereinigung zweier Körper sich die Gesamtgeschwindigkeit als gewogenes Mittel der Einzelgeschwindigkeiten ergibt. Letzteres wird Aristoteles von Galilei schlichtweg unterstellt. Eine entsprechende Aussage von Aristoteles ist nicht überliefert.

Simplicio kann sich mit dem Gedanken der Unabhängigkeit der Fallgeschwindigkeit vom Gewicht noch nicht anfreunden.

Simpl.: Eure Herleitung ist vortrefflich: und doch ist es mir schwer zu glauben, daß ein Bleikorn so schnell wie eine Kanonenkugel fallen soll.

Salv.: Sagt nur, ein Sandkorn so schnell wie ein Mühlstein. Ihr werdet, Herr Simplicio nicht, wie Andere, das Gespräch von der Hauptfrage ablenken und Euch an einen Ausspruch anklammern, bei welchem ich um Haaresbreite von der Wirklichkeit abweiche, indem Ihr unter dieses Haar verbergen wolltet den Fehler eines Anderen von Ankertau-Dicke. Aristoteles sagt, ein Eisenstab von 100 Pfund kommt von einer Höhe von 100 Ellen herabfallend in einer Zeit an, in welcher ein einpfündiger Stab frei herabfallend, nur eine Elle zurückgelegt hat: ich behaupte, beide kommen bei 100 Ellen Fall gleichzeitig an: Ihr findet, dass hierbei der größere um 2 Finger breit vorausseilt, so dass, wenn der grössere an der Erde ankommt, der kleinere noch einen Weg von 2 Fingerbreit Grösse zurückzulegen hat: Ihr wollt jetzt mit diesen 2 Fingern hinwegschmuggeln die 99 Ellen des Aristotelischen Fehlers, und nur von meiner kleinen Abweichung reden, den gewaltigen Irrthum des Aristoteles aber verschweigen. (S. 59)

Salviati (Galilei) erklärt die Abweichung von 2 Fingerbreit damit, daß die reine Wirkung der Schwere durch Dinge, die mit dem Medium in Verbindung stünden, wie die Gestalt, "getrübt" werde (vgl. Discorsi S. 59). Der Einfluß des Mediums wird also als Verunreinigung aufgefaßt. Bevor Galilei sich diesen Effekten mit einer eigenen Theorie zuwendet, widerlegt er die Aristotelische Beziehung zwischen Fallgeschwindigkeit und Dichte des Mediums.

b) Zur Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit von der Dichte des Mediums

Ausgangspunkt ist die Annahme eines bestimmten Verhältnisses der Dichten von Wasser und Luft ($D_W/D_L = 10/1$)

Salv.: Jetzt denke ich mir einen Körper, der in der Luft fällt, im Wasser steigt, wie etwa ein Stück Holz, und überlasse Euch zu bestimmen, wie rasch er sich in Luft bewegen solle.

Simpl.: Angenommen, es seien 20 Maass Geschwindigkeit.

Salv.: Gut. Offenbar kann diese Geschwindigkeit zu einer anderen in demselben Verhältnis stehen, wie die Dichtigkeiten von Wasser und Luft, letztere betrüge mithin 2 Maass; so dass wirklich, entsprechend dem Aristotelischen Satze, man geradezu behaupten müsste, in der Luft falle der Holzstab mit 20 Maass Geschwindigkeit, im Wasser mit 2 Maass, und solle im Wasser nicht emporsteigen, bis er schwimmt, wie doch geschieht. (...) Ihr (werdet) es zugeben, dass ein Stab von anderem Material sich finden könnte, der im Wasser wirklich mit 2 Maass Geschwindigkeit sich bewegte.

Simpl.: Gewiss, nur muss die Materie schwerer sein als Holz.

Salv.: Eben das suche ich. Aber dieser zweite Stab, der im Wasser mit 2 Maass Geschwindigkeit fällt, wie rasch würde er in der Luft fallen? Nach Aristoteles müsstet Ihr sagen, mit 20 Maass Geschwindigkeit: aber letztgenanntem Werth habt Ihr selbst dem Holze zuerkannt: also müssten beide, recht verschiedene Körper mit gleicher Geschwindigkeit in der Luft sich bewegen. Wie stimmt das zum ersteren Gesetz des Philosophen, demgemäß verschiedene Körper in ein und demselben Medium sich mit ganz verschiedenen Geschwindigkeiten bewegen, und zwar im Verhältnis ihrer Gewichte? (S. 60f)

Galileis Schlußfolge ist leicht nachzuvollziehen:

Annahme: $D_W/D_L = v_L/v_W = 10/1$

D_W : Dichte von Wasser

D_L : Dichte von Luft

v_W : Geschwindigkeit in Wasser

v_L : Geschwindigkeit in Luft

Annahme: Körper K_1 sinkt in Luft und steigt in Wasser: $v_{K_1L} < 0$, $v_{K_1W} > 0$

bei $v_{K_1L} = -20$ folgt $v_{K_1W} = -2$

D.h. der Körper würde in Wasser weiter sinken: Widerspruch zur obigen Festlegung!

Annahme: Körper K_2 sinkt in Wasser: $v_{K_2W} < 0$

bei $v_{K_2W} = -2$ folgt $v_{K_2L} = -20$

D.h. obwohl K_2 schwerer sein muß als K_1 , haben beide Körper in Luft die gleiche Fallgeschwindigkeit: Widerspruch zum Aristotelischen Fallgesetz!

Als weiteres Gegenargument führt Galilei an, daß ein Hühnerei und ein Marmorei, die sich in Wasser etwa mit einem Geschwindigkeitsverhältnis von 1 zu 100 bewegten, sich beim Fall in Luft kaum merklich unterschieden. Diese Überlegung spielt später bei Galileis eigener Theorie über den Fall im Medium eine entscheidende Rolle.

An dieser Stelle ist das Aristotelische Fallgesetz widerlegt. Galilei hat jedoch noch keine bessere Theorie präsentiert. Sagredo fragt folgerichtig danach, warum ein Stück Kork sich offensichtlich langsamer bewege als ein Stück Blei, und welche Abhängigkeit von der Dichte des Mediums Salviati (Galilei) an die Stelle der umgekehrten Proportionalität des Aristoteles setze. Galilei geht hierzu in zwei Schritten vor. Er führt zunächst einen kreativ-spekulativen Schluß auf das Verhalten von im Vakuum fallenden Körpern durch. Im Anschluß daran formuliert er eine Theorie für Bewegungen in einem widerstehenden Medium.

Galileis wohl bekannteste Aussage zum freien Fall lautet: "Alle Körper fallen im Vakuum gleich schnell". Sie konnte, wie Pukies richtig bemerkt, durch keine Beobachtung und durch kein Experiment gewonnen werden, da die Herstellung eines Vakuums zur Zeit Galileis nicht möglich war. "Allein spekulative Überlegungen, Abstrahieren von den naturgegebenen Bedingungen führte Galilei zu der Hypothese" (Pukies 1979, 17). Diese Aussage von Pukies könnte den Eindruck erwecken, Galileis Hypothese sei Produkt reiner Spekulation. Das wäre ein

falsches Bild - zumindest wenn man seiner Argumentation in den Discorsi folgt. Ich mache diese Einschränkung, weil der dort dargestellte Erkenntnisweg nicht dem von Galilei tatsächlich durchlaufenen entsprechen muß. Ein Charakteristikum von Lehrbüchern, und um ein solches handelt es sich bei den Discorsi, ist die nachträgliche Begradigung des Erkenntnisweges, seine Neuschreibung aus einer Position, in der der Verfasser über das Ergebnis bereits verfügt.

In den nächsten beiden Zitaten begründet Galilei seinen spekulativen Extrapolationsschluß von einem immer weiter verdünnten Medium auf das Leere. Es ist zu bezweifeln, daß er die geschilderten Experimente durchgeführt hat; sie entsprechen jedoch auch der unsystematischen Beobachtung. Wissenschaftssystematisch wichtiger erscheint mir, daß Galilei den Schluß auf das Leere überhaupt für sinnvoll hält, da doch alle tatsächlichen Fallbewegungen in einem Medium erfolgen. Die Begründung hierfür liegt in der Annahme, daß dem unmittelbar Vorfindlichen ein "reiner Effekt" (s.o.) zugrundeliege, den es herauszuarbeiten gelte.

Galilei sagt, nachdem er sich von der Unrichtigkeit der Aristotelischen Behauptungen $v \propto p$ und $v \propto 1/D$ überzeugt hätte, habe er Körper verschiedenen Gewichtes in unterschiedliche Medien gebracht.

(Ich) fand, dass die erzeugten Geschwindigkeiten um so mehr von einander abwichen, als der Widerstand des Mediums grösser war, und zwar in solchem Betrage, dass zwei Körper, die in der Luft nur sehr wenig verschieden fallen, im Wasser um's Zehnfache differiren können. (S. 62)

Wir sahen, dass die Differenz der Geschwindigkeiten verschiedener Körper von verschiedenem (specifischen) Gewicht im Allgemeinen grösser war in den stärker widerstehenden Medien. (...) Angesichts dessen glaube ich, dass, wenn man den Widerstand der Luft ganz aufhobe, alle Körper ganz gleich schnell fallen würden. (S. 65)

"Gleich schnell" bedeutet, daß zum Durchfallen der gleichen Strecke s die gleiche Zeit t benötigt werde. Über den Charakter der Bewegung, ob beschleunigt oder gleichförmig ist hier nichts ausgesagt. In Galileis Aussagen steckt die Annahme, daß nicht die Schwere des Körpers, sondern allein das Medium für unterschiedliche Fallzeiten ursächlich sei (vgl. Discorsi S. 66). Darin liegt ein wesentlicher Fortschritt gegenüber den Falltheorien der Impetustheorie (siehe Abschnitt A dieses Kapitels).

Galileis Theorie zum Fall im Medium kann man in zwei Thesen kleiden.

These 1: Ich behaupte, dass ein schwerer Körper von Natur aus das Princip in sich birgt, sich gegen das gemeinsame Centrum schwerer Körper zu bewegen, d.h. gegen unseren Erdball, und zwar mit einer stetig und gleichmäßig beschleunigten Bewegung, dergemäss in gleichen Zeiten gleiche neue Geschwindigkeiten hinzugefügt werden. (S. 67)

In dieser These findet sich die Aristotelische Vorstellung der "natürlichen Bewegung" wieder. Galilei hat keine dynamische Theorie über den Zusammenhang von Bewegungen und Kräften entwickelt, obwohl er, wie das nächste Zitat zeigt, nah dran war an einem Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung. Neu und von entscheidender Bedeutung ist die Annahme einer gleichmäßig beschleunigten Fallbewegung.

These 2: Der Widerstand des Mediums ist nicht zu beseitigen. Er ist um so größer ...

... je geschwinder das Medium sich öffnen muss, um den Körper hindurchzulassen, welch' letzterer daher, von Natur beschleunigt fallend, einen stets wachsenden Widerstand erfährt. Daher entsteht eine Verzögerung und Verminderung aller neuerworbener Geschwindigkeiten, sodass schließlich diese, sowie die erzeugten Widerstände einen Grad erreichen, dass sie sich unter einander ausgleichen und alle Beschleunigung aufheben, und der Körper in eine gleichförmige Bewegung geräth, in welcher er fernerhin verharret. Daher liegt die Vergrößerung des Widerstandes in dem Medium. (S. 67)

Galilei beschreibt exakt einen Relaxationsvorgang, wie er heute für abgerundete Körper mittels des Stokesschen Gesetzes erfaßt wird. Im Gleichgewicht zwischen Gewichts-, Reibungs- und Auftriebskraft ist die Geschwindigkeit proportional zur Differenz der Dichten des Körpers und des Mediums und umgekehrt proportional zur Viskosität des Mediums: $v \text{ prop. } (D_K - D_M)/\eta$.

Galilei geht davon aus, daß das Medium dem Körper soviel an Gewicht entzieht, wie der verdrängte Teil des Mediums wiegt (Prinzip des Archimedes). Der Überschuß des Gewichts sei das Hilfsmittel, mit dem der Körper sich seine Bahn breche (vgl. Discorsi S. 68). Bei Annahme der Verhältnisse

Schwere von Blei/Schwere von Luft = 10.000/1

Schwere von Ebenholz/Schwere von Luft = 1.000/1

werde die Luft der Geschwindigkeit des Bleis 1/10.000 entziehen, der des Ebenholzes 10/10.000 Einheiten. Zerteile man die Fallhöhe in 10.000 Teile, so werde das Ebenholz 10 - 1 = 9 Teile zurückstehen.

Galilei sagt nicht, worauf er die Berechnung bezieht, auf die Gleichgewichtsgeschwindigkeit oder auf eine andere. Nach meiner Interpretation bezieht er die Berechnung eigentlich auf die Fallzeit und geht implizit von einer Durchschnittsgeschwindigkeit für den gesamten Fall aus. Weiterhin ist zu beachten, daß er den beteiligten Körpern für den Fall im Vakuum eine gleiche (Durchschnitts-) Geschwindigkeit von x Teilen zuschreibt (z.B. 10.000 Einheiten). Die davon abzuziehende Geschwindigkeit berechnet sich dann:

entzogene Geschwindigkeit = Schwere des Mediums/Schwere des Körpers

wobei es nur auf das jeweilige Verhältnis ankommt, bei dem die Schwere des Körpers gleich x gesetzt wird. Ein weiteres Beispiel (nach Galilei):

Schwere von Wasser/Schwere von Blei = $1/12$ ($x = 12$)

Schwere von Wasser/Schwere von Elfenbein = $1/2 = 6/12$

Schlußfolgerung: "Wenn also Blei elf Ellen gefallen ist, hat das Elfenbein 6 zurückgelegt" (S. 68). Mit anderen Worten: Wenn die Geschwindigkeiten sich verhalten wie $11/6$, legt das Blei in der Zeit t 11 Ellen zurück und das Elfenbein 6. Damit wird auch die erste Rechnung verständlicher: Die Geschwindigkeiten von Blei und Ebenholz verhalten sich wie 9.999 zu 9.990. In der Zeit t , in der beim freien Fall im Vakuum 10.000 Ellen zurückgelegt worden wären, fällt Blei in Luft 9.999 Ellen, Ebenholz 9.990 - Differenz 9 Ellen. Eine Formel für Galileis Fallgesetz würde in heutiger Schreibweise lauten:

$$v_{K_1}/v_{K_2} = (1 - D_{M_1}/D_{M_2}) / (1 - D_{M_2}/D_{K_2})$$

v_{K_i} : Geschwindigkeit des i -ten Körpers im i -ten Medium

D_{M_i} : Dichte des i -ten Mediums

D_{K_i} : Dichte des i -ten Körpers

$i = 1, 2$

Für den Fall zweier Körper K_1 und K_2 gleichen Volumens im Medium M ergibt das Galileische Fallgesetz:

$$v_{K_1}/v_{K_2} = [(D_{K_1} - D_M)/(D_{K_2} - D_M)] \cdot (D_{K_2}/D_{K_1})$$

Für den Fall eines Körpers K in zwei unterschiedlichen Medien M_1 und M_2 ergibt sich:

$$v_{M_1}/v_{M_2} = (D_K - D_{M_1})/(D_K - D_{M_2})$$

Hiermit würden wir die Versuche genauer übereinstimmen sehen als mit den Überlegungen des Aristoteles. (S. 68)

Dem kann man zunächst zustimmen. Die so zu berechnenden Geschwindigkeiten kommen den tatsächlichen Verhältnissen der Fallzeiten erheblich näher als die nach dem Aristotelischen Fallgesetz gewonnenen. In zwei Belangen ist das Galileische Fallgesetz jedoch unbefriedigend. Es berücksichtigt nur den Einfluß des Auftriebs. Der in These 2 enthaltene korrekte Zusammenhang zwischen Fallgeschwindigkeit und geschwindigkeitsabhängigem Widerstand wird nicht aufgegriffen. Der Charakter einer beschleunigten Bewegung wird nicht deutlich.

Nach der Präsentation seines Fallgesetzes für widerstehende Medien kommt Galilei zurück auf die "eigentliche" Unabhängigkeit der Fallgeschwindigkeit von

der Schwere eines Körpers.

Diese Lehre, sage ich, ist vollkommen neu und auf den ersten Blick recht unwahrscheinlich, so dass, wenn man sie nicht genug aufhellen und klarer als die Sonne erscheinen lassen könnte, es besser wäre, sie zu verschweigen als ihr den Ausdruck zu geben; denn obwohl ich die Sache nun schon habe meinen Lippen entschlüpfen lassen, so muss ich doch noch die beweisenden Experimente nachholen. (S. 74)

Als "beweisende Experimente" nennt Galilei die Pendelschwingung einer Blei- und einer Korkkugel, die absolut synchron verliefen: "Weder in 100 noch in 1000 Schwingungen (war) die kleinste Verschiedenheit zu merken". Es komme zwar zu einer stärkeren Abnahme der Amplitude der Schwingung der Korkkugel als der Bleikugel, denn die erstere habe wegen ihrer Leichtigkeit weniger Macht den Widerstand der Luft zu überwinden, doch seien die Schwingungsdauern absolut konstant, auch wenn die Auslenkung der Korkkugel nur noch 5 Grad betrage und die der Bleikugel 50 Grad. Ja sogar bei 90 Grad Auslenkung sei kein Unterschied in den Schwingungsdauern zu bemerken.

Die Pendelschwingung soll das wiederholte Herabfallen durch geringe Höhenunterschiede simulieren. Durch die Akkumulation der "Fallwege" erreiche man große Fallstrecken und vermeide gleichzeitig große Geschwindigkeiten, damit "die Arbeit des Widerstandes, die Wirkung der Schwere zu vermindern, kleiner ist".

Die Pendelexperimente sind typisch für Galileis Methode des Hineinprojizierens eines theoretischen Entwurfs (hier: Unabhängigkeit der Fallgeschwindigkeit vom Gewicht) in die Natur. Sie zeigen aber auch, wie schwierig solche Realisationshandlungen sind. Das Argument, es komme für den beabsichtigten Beweis nur auf die Schwingungsdauer und nicht auf die Durchschnittsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Auslenkungen an, ist gekünstelt. Außerdem kann Galileis Bericht über den Ausgang der Versuche nicht aufrichtig sein. Als sorgfältiger Experimentator hätte er bei "1000 Schwingungen" und einem Auslenkungsbereich von 5 bis 90 Grad eine Abhängigkeit der Schwingungsdauer vom Auslenkwinkel feststellen müssen. Vermutlich hat Galilei die Effekte als "Verunreinigungen" vernachlässigt und im Bericht verschwiegen. Das relativiert nochmals die Bedeutung realer Experimente für Galileis Erkenntnisgewinnung.

Sagredo fragt Salviati (Galilei) im Anschluß erneut nach den Ursachen der beobachtbaren Unterschiede der Fallgeschwindigkeiten von Körpern, besonders in dichten Medien. Salviati verweist auf den bereits ausführlich behandelten Einfluß des Auftriebs. Danach geht er auf Körper gleichen Materials und gleicher Gestalt aber unterschiedlicher Größe ein (z.B. kleine und große Bleikugeln), die in widerstehenden Mitteln fallen. Hierfür erklärt Galilei die Unterschiede in den

Fallgeschwindigkeiten so:

Ich führe die fragliche Erscheinung auf die Rauhigkeit und Porosität zurück, die auf allen Oberflächen fester Körper vorhanden ist, eine Rauhigkeit, welche Reibung erzeugt in der Luft oder in anderem umgebendem Mittel. (S. 78)

Man erkenne die Reibung zwischen Körperoberfläche und umgebendem Medium am Brausen, Pfeifen oder Zischen bei einer Fallbewegung in Luft. Bei Körpern aus gleichem Material (d.h. gleicher Dichte) erleide der kleinere Körper eine größere Verzögerung, weil das Gewicht in größerem Verhältnis abnehme als die Oberfläche. Daher verringere sich der Überschuß des Gewichts, mit dessen Hilfe der Körper sich seine Bahn breche, stärker als der Reibungswiderstand.

Damit sind die Ausführungen zum Fall in widerstehenden Medien im wesentlichen abgeschlossen. Galilei hat natürlich nicht die ganze Vielfalt der realen Effekte abgedeckt. Sein Fallgesetz berücksichtigt nur den Auftrieb. Der Einfluß der Oberfläche wird nicht für beliebige Gestalten diskutiert, sondern für das Verhältnis Oberfläche zu Volumen, bzw. Gewicht bei Körpern gleicher Gestalt. Galilei hat die Fallbewegung so aufbereitet, daß er Einzeleffekte getrennt abhandeln kann. Dies geschieht teils quantitativ (Fall im Vakuum, Auftrieb, Verhältnis Oberfläche/Volumen), teils qualitativ (Relaxation, Oberflächenreibung). Aus der Synthese dieser Einzeleffekte kommt man den realen Bewegungen sehr viel näher als bei der ganzheitlichen Zugangsweise des Aristoteles.

Damit schließen wir die kommentierten Auszüge aus Galileis 'Discorsi' von 1637 ab.

D.3.5 Die neue Erkenntnisweise der galileisch-newtonschen Physik (Forts.)

Rekapitulieren wir Galileis Vorgehensweise bei der Behandlung des freien Falls:

1. Definition der "gleichförmigen Bewegung"
2. Definition der "einförmig beschleunigten Bewegung". Wesentlicher Punkt:
 - Wahl des freien Falls als Paradigma
 - Einführung der Zeit als Parameter in den Bewegungsgleichungen
3. Entwicklung einer empirisch überprüfbaren Hypothese über den Zusammenhang von Weg und Zeit bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung. Schritte:
 - Übertragung der Fallbewegung auf die schiefe Ebene
 - Deduktion der Beziehung $s_1/s_2 = t_1^2/t_2^2$ unter Zuhilfenahme des Mittelwertsatzes für Geschwindigkeiten bei beschleunigten Bewegungen
4. Durchführung von Experimenten mit Fallrinnen (schiefen Ebenen), die die genannte Weg-Zeit Beziehung bestätigen.

In der vorgeblichen Wahl der Bewegungen, "die bei den frei fallenden Körpern in der Natur vorkommen", als Musterfall der gleichförmig beschleunigten Bewegung liegt der entscheidende Knackpunkt der gesamten Betrachtung. Hätte Galilei das wirklich getan, so wäre er nie beim Weg-Zeit Gesetz $s \propto t^2$ angelangt (vgl. These IV). Kein natürlich fallender Körper verhält sich exakt danach. Galilei hat nicht den erfahrbaren freien Fall diskutiert, sondern den gedachten Idealtypus des freien Falls, so wie er ihn zuvor in der Aristoteles-Kritik entwickelt hat ("Alle Körper fallen im Vakuum gleich schnell"). Versteckt drückt sich das in dem Satz aus "(Wir) lassen die Definition der beschleunigten Bewegung zusammenfallen mit dem Wesen einer natürlich beschleunigten Bewegung" (meine Hervorhebung). Galilei erklärt die Erlangung gleicher Geschwindigkeitszuwächse in gleichen Zeiten entgegen der Erfahrung und entgegen seiner eigenen Aussage, daß jeder Körper beim Fall in seiner Bewegung durch das Medium beeinflusst wird (s.u.), zum Wesen der Bewegung frei fallender Körper.

Zu Zeiten Galileis, als die Existenz des Leeren erstens umstritten war und zweitens ein solches nicht künstlich hergestellt werden konnte, war dieser Gedanke revolutionär. Warum sollte man etwas zum Wesen eines Phänomens erheben, das es nirgends gab? Aristoteles erschienen Bewegungen im Vakuum, wie wir gesehen haben, absurd. Für Galilei dagegen hindert das Medium den Körper lediglich daran, seiner eigentlichen Bewegung zu folgen. Abweichungen von der Beziehung $s \propto t^2$ sind für ihn Sekundäreffekte, die das Wesen der Bewegung verdecken. Die Überzeugung vom Vorliegen einfacher geometrischer Zusammenhänge in der Natur führt ihn dazu, die von ihm durchgeführten Experimente mit der schiefen

Ebene als Bestätigung seiner gedanklichen Entwürfe zu betrachten. Empirisch können die Belege nicht überzeugend gewesen sein.

Galilei hat sich von den zufälligen Erscheinungen der alltäglichen Erfahrung bei der systematischen Durchdringung der Natur auf zweierlei Weise befreit. Gegenstand seiner gedanklichen Analysen sind spekulativ angenommene ideale Gestalten, die, durch akzidentielle Faktoren verdeckt, der Anfaß- und Vorzeigerealität zugrundeliegen. Gegenstand seiner experimentellen Untersuchungen ist die Schaffung einer den idealen Gestalten gemäßen Realität. Die idealen Gestalten werden im Prozeß der Realisierung in die Natur hineinprojiziert (vgl. Holzkamp 1968, "Realisationshandlung").

Kant, der Newton besonders verehrte und der einen Teil seiner Schriften als Untermauerung der von Galilei und Newton begründeten neuen naturwissenschaftlichen Methode verstand (Kant hat eigene Arbeiten zum Kraftbegriff und zur Newtonschen Gravitationstheorie veröffentlicht), bringt die neue Herangehensweise in der 'Kritik der reinen Vernunft' auf den Punkt:

Als Galilei seine Kugeln die schiefe Fläche mit einer von ihm selbst gewählten Schwere herabrollen (ließ) ... ging allen Naturforschern ein Licht auf. Sie begriffen, daß die Vernunft nur das einsieht, was sie selbst schon nach ihrem Entwurfe hervorbringt, daß sie mit Prinzipien ihrer Urteile nach beständigen Gesetzen vorangehen und die Natur nötigen müsse auf ihre Fragen zu antworten, nicht aber sich von ihr allein gleichsam am Leitbände gängeln lassen müsse; denn sonst hängen zufällige, nach keinem vorher entworfenen Plane gemachte Beobachtungen gar nicht in einem notwendigem Gesetze zusammen, welches doch die Vernunft sucht und bedarf. (...) Und so hat sogar Physik die so vorteilhafte Revolution ihrer Denkart lediglich dem Einfalle zu verdanken, demjenigen, was die Vernunft selbst in die Natur hineinlegt, gemäß, dasjenige in ihr zu suchen (nicht ihr anzudichten), was sie von dieser lernen muß und wovon sie für sich selbst nichts wissen würde. Hierdurch ist die Naturwissenschaft allererst in den sicheren Gang einer Wissenschaft gebracht worden, da sie so viel Jahrhunderte durch nichts weiter als bloßes Herumtappen gewesen war.

(Kant 1976, 17f)

Die Frage an die Natur lautet nicht "Wie sind Deine inneren Zusammenhänge?" (was übrigens bereits voraussetzt, daß es solche gibt), sondern "Entsprechen Deine inneren Zusammenhänge meinem theoretischen Entwurf?". Die Natur hat die Möglichkeit, sich dem speziellen Entwurf zu versagen. Das akzeptiert der Forscher allerdings erst dann, wenn zahlreiche modifizierte Versuche der Projektion seines Entwurfs fehlgeschlagen sind.

Der theoretische Entwurf der natürlich beschleunigten Bewegung fallender Körper deckt das Wesen der Fallbewegung auf. Galilei bleibt dort jedoch nicht stehen. In manchen Berichten über Galileis Falluntersuchungen gewinnt man den Ein-

druck, als seien diese mit der Aussage "Alle Körper fallen im Vakuum gleich schnell" abgeschlossen (z.B. in Pukies 1979). Daß dem nicht so ist, haben wir am Galilei-Text belegt. Galilei hat das Bestreben, ein Fallgesetz zu entwickeln, das die Bewegung im Medium besser beschreibt, als das des Aristoteles. Nur der Weg dorthin ist grundsätzlich anders. Er führt über den Idealtypus des freien Falls im Vakuum, dem erst anschließend Auftriebs- und Oberflächeneffekte sowie das Verhältnis von Oberfläche zu Masse überlagert werden. Galilei zerlegt die Fallbewegung gedanklich in Einzeleffekte, diskutiert diese getrennt und synthetisiert daraus wieder ein Phänomen, das der Erfahrung nahekkommt. All das geschieht unter der Anleitung des Konstrukts "idealer freier Fall". Galilei selbst betont, daß bei jedem realen Fall die Beschleunigung mit der Zeit abnimmt:

Eine Kugel (kann) nie zu gross, noch zu schwer gedacht werden, als dass der Widerstand des Mediums, wenn letzteres auch noch so dünn ist, nicht die Beschleunigung vermindere, und bei fortgesetzter Bewegung dieselbe zuletzt gleichförmig werden lasse. (...) Darum glaube ich, dass eine jede Beschleunigung unter natürlichen Verhältnissen ein Ende erreicht, und eine gleichförmige Bewegung eintritt.
(Galilei 1637, 81f)

Die ideale Gestalt des kontinuierlich beschleunigten freien Falls ist ein analytisches Instrument zur Erfassung der Fallbewegung. Sie ist weder unmittelbare Realität noch Selbstzweck oder Endpunkt der naturwissenschaftlichen Reflexion.

Die Zielsetzung, das natürliche Geschehen als Zusammenspiel einfacher und trennbarer Idealtypen zu rekonstruieren, hat allerdings zur Folge, daß nur eine sehr begrenzte Auswahl aus dem Naturgeschehen einer physikalischen Betrachtungsweise zugeführt wird, nämlich gerade die Phänomene, bei denen das Unterfangen eine gewisse Aussicht auf Erfolg verspricht. Daher rührt die Konzentration der klassischen Mechanik auf die einfachen Fall-, Wurf-, Pendel- und Planetenbewegungen und die Ausblendung solch komplexer Phänomene wie der Bewegung eines Blattes im Wind.

In einem Gespräch mit dem Weser-Kurier (28. Januar 1984) äußerten die Bremer Professoren Peitgen und Richter, die an Problemen der Beschreibung komplexer dynamischer Systeme arbeiten, die Auffassung, die Physik habe sich bisher nur mit extremen Sonderfällen der Natur befaßt, in denen die Welt außerordentlich vereinfacht erscheine. In der Wirklichkeit könnten selbst sehr einfache Zusammenhänge enorm komplexe Gestalt annehmen. Erst der Einsatz von Computern eröffne die Möglichkeit, sich der vielfältigen Wirklichkeit zu nähern.

Die moderne Physik beginnt sich in den Gebieten der nichtlinearen Dynamik und der Thermodynamik fernab von Gleichgewichtszuständen ("Chaos-Physik") stärker der Komplexität realer Systeme zuzuwenden. Aber auch hier ist letztlich das

Ziel, Ordnungsstrukturen ("dissipative Strukturen") im vermeintlich Chaotischen aufzuspüren, bzw. der Natur solche aufzuerlegen.

Prigogine, einer der Protagonisten dieser Forschungsrichtung, zitiert Einstein dahingehend, daß der unbestreitbare Verzicht des physikalischen Weltbildes auf Vollständigkeit und die Erfassung des Komplexen kein prinzipieller sei. Die allgemeinen Gesetze der Physik erhöhen den Anspruch, daß jede Naturerscheinung auf sie abbildbar sei (vgl. Prigogine 1980, 59f). Auf diese Weise trägt die genaue Kenntnis des Einfachen zur prinzipiellen Kenntnis des Komplexen bei.

Für Galilei waren die mathematischen Modelle, die er der Natur unterlegte, geometrische Figuren. Newton und Leibnitz brachten die Differentialrechnung ein. Heute braucht man Großrechner, um die Gleichungssysteme zu integrieren. Die gemeinsame Grundüberzeugung hat niemand so treffend formuliert wie Galilei:

Die Philosophie ist in dem großen Buch niedergeschrieben, das vor unseren Augen immer offen liegt, ich meine das Universum. Aber wir können es erst lesen, wenn wir die Sprache gelernt haben und mit den Zeichen vertraut sind, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben, und seine Buchstaben sind Dreiecke, Kreise und andere geometrische Formen; ohne diese Mittel ist es dem Menschen unmöglich, auch nur ein einziges Wort zu verstehen.
(Galilei nach Crombie 1977, 374)

Die Bedeutung der Mathematik für die Naturwissenschaft hat sich gegenüber Aristoteles grundlegend gewandelt. Auch vor Galilei war gerechnet worden, z.B. in der Astronomie. Dies geschah aus praktischen Motiven, zur Vorhersage von Jahreszeiten oder für die Navigation. Naturerfahrung drückte sich in mathematischen Beziehungen nicht aus. Ebenso veränderte sich die Rolle des Meßprozesses. Im Mittelalter wurde gemessen, um den Handel zu organisieren, um die Jahres- und Tageszeit zu bestimmen oder Karten anzufertigen. Mechanische Geräte wurden verwendet um die Natur zu überlisten, nicht um ihr Wesen zu ergründen (vgl. den griechischen Wortstamm von "Mechanik").

Galilei verknüpfte die abstrakte euklidische Geometrie und die konkrete Anfaß- und Vorzeigerealität auf eine ganz spezifische Weise. Einerseits besteht eine strikte Trennung zwischen den idealen Gestalten, die Galilei in der Sprache der Geometrie zeichnet und den der Erfahrung zugänglichen und meßbaren Phänomenen. Andererseits werden die Bereiche durch den Prozeß der Realisationshandlung vereint. Unter "idealen Versuchsbedingungen", die aus dem theoretischen Entwurf abgeleitet sind, werden Phänomene geschaffen, die in guter Näherung der theoretisch vorhergesagten Form entsprechen. Es wird ein reales Abbild der idealen Gestalt geschaffen (ein "reines" Phänomen). Ihren Nutzen für die

Erkenntnis der Naturzusammenhänge erweisen die idealen Gestalten dadurch, daß es gelingt, die realen Vorgänge aus ihrer Synthese aufzubauen.

Galilei war der Wegbereiter der neuen naturwissenschaftlichen Methode - ihre Vollendung erfuhr sie durch Newton. Erst Newton gelang der letzte Schritt zur konsistenten Beschreibung von Bewegungen unter dem Einfluß von Kräften. Seine ideale Gestalt ist die lineare Trägheitsbewegung - ein Konzept, über das Galilei nicht verfügte. Newton ist der endgültige Durchbruch in der Dynamik gelungen, weil er konsequent gedanklich zwischen der abstrakten Welt der idealen Gestalten (Newton nannte das "Mathematik") und der physischen Anfaß- und Vorzeigerealität ("Philosophie" oder "Physik") unterschied. Cohen (1981, 164) schreibt dazu:

I think it is fair to say, that it was the freedom to consider problems either in a purely mathematical or in a "philosophical" (or physical) way that enabled Newton to express the first law and to develop a complete inertial physics.

Der Trägheitssatz und der Newtonsche Kraftbegriff sind zwei verschiedene Seiten derselben Medaille. Der Newtonsche Kraftbegriff beruht auf dem Entschluß, alle Bewegungsänderungen auf das Wirken von Kräften zurückzuführen. Völlig äquivalent zu dieser Aussage ist die Festlegung, daß eine kräftefreie Bewegung unendlich lange mit konstanter Geschwindigkeit verläuft. Die kräftefreie Trägheitsbewegung kann nur eine gedankliche Gestalt sein. Sie ist nirgends im Universum beobachtbar - und dennoch ist sie Grundlage der Newtonschen Dynamik. Einstein (1979, 75) hat die Idee des Trägheitssatzes im Verschwinden der Komponenten der Beschleunigung für einen materiellen Punkt, der von allen anderen hinreichend weit entfernt ist, ausgedrückt. (Im Konzept des "materiellen Punkts" liegt eine zweite wichtige ideale Gestalt der Newtonschen Mechanik.) Unter irdischen Verhältnissen gibt es keine natürlichen Anlässe, die nahelegen würden, gerade die geradlinig gleichförmige Bewegung zum Ausgangspunkt der Dynamik zu wählen. Heutige Versuche, auf Luftkissenfahrbahnen solche Bewegungen anzunähern, sind nachgeordnete Realisierungsanstrengungen, die den theoretischen Entwurf voraussetzen. Die "natürliche" Erfahrung sagt vielmehr, daß jede Bewegung nach endlicher Zeit zur Ruhe kommt. Aristoteles Einwände haben wir zu Anfang des Gesamtkapitels referiert. Sie lauten sinngemäß: "Jede Bewegung kommt irgendwann zum Stillstand. Man muß also erklären, warum sich ein Körper bewegt, nicht warum er zur Ruhe kommt. Letzteres ist natürlich. Es ist unsinnig, sich mit unendlich lange andauernden Bewegungen zu befassen, da es solche nirgends gibt." Einwände von Schülern gegen das Trägheitsdenken liegen oft auf der gleichen Linie (vgl. Fallstudie 1, Punkt E.2).

Um hier gleich einem Mißverständnis vorzubeugen: Newtons Theorie deckt alle realen Bewegungen ab. Newton widmet sich im zweiten Buch der Principia eingehend Bewegungen unter Reibungseinflüssen. Gegenstand des Trägheitssatzes sind nicht etwa tatsächliche Bewegungen fernab von allen Planeten. Das erste Axiom leistet Hilfestellung bei der Untersuchung realer Bewegungen in Form eines Suchprogramms: Wenn sich der Impuls eines Körpers ändert, suche nach den mit ihm wechselwirkenden Körpern, bzw. nach den angreifenden Kräften. Bei Aristoteles und auch bei den Impetustheoretikern war das "Erschlaffen" der (erzwungenen) Bewegung als selbstverständliche Tatsache einer genaueren Betrachtung entzogen, es bestand kein "Erklärungsbedarf". Toulmin (1969, 121) hat den Übergang von der aristotelischen zur newtonschen Physik dadurch beschrieben, daß vormals komplizierte Bewegungen einfach werden (wie die Bewegung eines geworfenen Steins), während einfache Bewegungen nun kompliziert erklärt werden müssen (z.B. warum ein Ochsenkarren anhält, wenn das Geschirr reißt).

Der Entschluß zum konsequenten Trägheitsdenken fällt Schülern schwer. Eine Ursache ist die Dominanz der Alltagserfahrung, daß zum Aufrechterhalten einer Bewegung immer eine Kraft notwendig ist. Dies steht noch nicht im Widerspruch zum Newtonschen Trägheitssatz. Erst die Aussage, diese Kraft müsse größer sein als der Widerstand, läßt sich mit der Newtonschen Mechanik nicht vereinen. (Hier werden im Unterricht manchmal Scheinprobleme produziert.) Das zweite Axiom macht Aussagen über die Änderung des Schwerpunktimpulses bei Vorliegen einer resultierenden Kraft. Das Vorliegen einer Einzelkraft in Bewegungsrichtung bei Bewegungen unter Reibungseinflüssen, also bei allen realen Bewegungen, ist eine vollkommen korrekte newtonsche Aussage.

Im Alltagsdenken wird jedoch der Bewegungswiderstand als nicht erklärungsbedürftige, "natürliche" Gegebenheit behandelt. Seine explizite Erfassung als Kraft, setzt den Entschluß zum Trägheitsdenken voraus, das in der natürlichen Erfahrungswelt nicht angelegt ist. Im Alltagssprachgebrauch ist Reibung ein "Widerstand", der durch Kräfte "überwunden" werden muß. Als Kräfte geraten nur Einwirkungen ins Blickfeld, die dem intendierten Ziel der Handlung dienen, die also absichtsvoll eingesetzt werden (vgl. Präkonzept 4 "Kraftausübung als Aktivität").

Schüler verstehen die Aussagen des ersten und zweiten Axioms teilweise dahingehend falsch, daß sie das erste Axiom auf irgendwelche Bewegungen "im Welt-raum" beschränken und daß sie meinen, nach dem zweiten dürfe bei einer gleichförmigen Bewegung an einem Körper überhaupt keine Kraft angreifen. Das letztgenannte Mißverständnis beruht auf einer mangelhaft ausgeprägten Unterscheidung zwischen Einzelkräften und der Resultierenden. Das erste ist Aus-

druck einer Fehleinschätzung der Funktion idealer Gestalten. Beides führt dazu, die Axiome für die Beschreibung von realen Phänomenen als ungeeignet zu betrachten. Wir werden diese Aspekte im Anschluß an die historisch-wissenschaftstheoretischen Ausführungen unter Punkt D.6 "Didaktische Relevanz der Ergebnisse" ausführen.

Kehren wir vorerst zur geschichtlichen Entwicklung zurück. Galilei verfügte über ein eingeschränktes Trägheitskonzept, das zwar weit über das Impetusdenken hinausging, aber noch auf die Erde als Bezugspunkt festgelegt war und so keinen universellen Entschluß zum Trägheitsdenken darstellte. Galilei hat an keiner Stelle seiner Untersuchungen zur Mechanik explizit ein Kraftkonzept formuliert. Man muß bedenken, daß Galileis Ziel im Rahmen seiner Verteidigung des kopernikanischen Weltsystems die Denkbarmachung der täglichen Drehung der Erde um ihre eigene Achse war. Dafür brauchte er ein zirkuläres Trägheitsprinzip. Ein lineares hätte nur in Verbindung mit der Einführung einer Zentralkraft zum gleichen Erfolg führen können.

Im 'Dialog' (Galilei 1630) entwickelt Galilei das zirkuläre Trägheitsprinzip an zwei Stellen (S. 33f, S. 152ff). Die zweite Passage ist in ihrer Form des Lehrgesprächs zwischen Salviati (Galilei) und Simplicio (dem Peripatetiker) besonders beeindruckend. Sie illustriert Galileis Methode der Gedankenexperimente mit idealen Gestalten zur Aufstellung von allgemeinen Sätzen. Galilei entwickelt den Trägheitssatz an der Bewegung einer "vollkommen runden Kugel auf einer ausgezeichnet glatten Oberfläche", die bei Absehen von "allen zufälligen Hindernissen" nach einem Anstoß "unvertilgbar fortbesteht", wenn die Fläche sich weder dem Erdmittelpunkt nähert, noch sich von ihm entfernt. Der theoretische Entwurf findet anschließend bei der Klärung der konkreten Frage Anwendung, wo ein von der Mastspitze eines fahrenden Schiffes fallender Stein aufschlägt.

Das entwickelte Trägheitsprinzip ist ein zirkuläres. Es gilt für die Planetenbewegung und für Fallbewegungen auf der sich drehenden Erde. Der theoretische Entwurf ist nicht so weit gediehen, daß die ideale Ebene von der Erdoberfläche abgelöst wird. In einem von Galilei nicht veröffentlichten frühen Manuskript 'De Motu' (Galilei 1960) wird der Gedankengang so formuliert:

We must assume that the plane is, so to speak, incorporeal or, at least, that it is very carefully smoothed and perfectly hard, so that, as the body exerts its pressure on the plane, it may not cause a bending of the plane and somehow come to rest on it, as in a trap. And the moving body must be (assumed to be) perfectly smooth, of a shape that does not resist motion, e.g. a perfectly spherical shape, and of the hardest material or else a fluid like water. If everything is arranged in this way, then any body on a plane parallel to the horizon will be moved by the smallest force, indeed by a force less than any

given forces. (...)

A body subject to no external resistance on a plane sloping no matter how little to the horizon will move down (the plane) in natural motion, without the application of any external force. This can be seen in the case of water. And the same body on a plane sloping upward, no matter how little, above the horizon, does not move up (the plane) except by force. And so the conclusion remains that on the horizontal plane itself the motion of the body is neither natural nor forced. But if its motion is not forced motion, then it can be made to move by the smallest of all possible forces.

(Galilei 1960, 65f; Hervorhebung d. Verf.)

Man erkennt in der Frühschrift deutlich Elemente der Aristotelischen Bewegungslehre mit ihrer Unterscheidung zwischen natürlicher und erzwungener Bewegung. Galilei ist hart am linearen Trägheitskonzept dran. Aber er vollendet es nicht. Galilei schreibt, ein Einwand gegen seine Aussage könne lauten,

that a plane cannot be actually parallel to the horizon, since the surface of the earth is spherical, and a plane cannot be parallel to such a surface. Hence, since the plane touches the sphere in only one point, if we move away from that point, we shall have to be moving up.

(Galilei 1960, 68)

Galilei "biegt" die Ebene um die Erde. An dieser Stelle scheitert Galilei an der Aufstellung des linearen Trägheitsprinzips. In späteren Darstellungen, etwa im 'Dialog' taucht keine so differenzierte Behandlung von ebener und "gekrümmter" Ebene mehr auf.

Erst die endgültige epistemologische Trennung zwischen der Welt der idealen Gestalten und der Anfaß- und Vorzeigerealität bei Newton ermöglichte die Vollendung des Kraft-Trägheit-Denkens.

In den Principia lautet der Trägheitssatz (1. Axiom):

Jeder Körper beharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.

(Newton 1963, 32)

Newtons Werk heißt nicht ohne Grund "Mathematische Prinzipien der Naturlehre". Der Titel ist Ausdruck der von Newton verfochtenen Unterscheidung zwischen der "mathematischen" Analyse von Bewegungsverläufen (wir nennen das die Aufstellung theoretischer Entwürfe auf der Grundlage idealer Gestalten) und der Übertragung ihrer Ergebnisse auf Naturvorgänge (Newton nennt das "Physik"; wir sprechen von der Realisationshandlung). Die Frage nach dem "Warum" der Phänomene verweist Newton in das Reich der Spekulation. Ihm genügt das "Wie".

In der Mathematik hat man die Grösse der Kräfte und diejenigen Ver-

hältnisse derselben zu erforschen, welche aus gewissen vorausgesetzten Bedingungen hervorgehen. Steigt man hierauf zur Physik herab, so hat man diese Verhältnisse mit den Erscheinungen zu vergleichen, um zu erfahren, welche Bedingungen der Kräfte den einzelnen Arten anziehender Kräfte zukommen. Hierauf kann man endlich über die Gattungen der Kräfte, und über ihre physikalischen Ursachen und Verhältnisse streiten.

(Newton 1963, 32)

Newton lehnt es ab, sich mit möglichen Ursachen der Kräfte zu beschäftigen (darauf zielt sein Ausspruch "hypotheses non fingo"). So schreibt er im Eingangskapitel mit Bezug auf Zentralkräfte:

Die Benennung: Anziehung, Stoss oder Hinneigung gegen den Mittelpunkt nehme ich ohne Unterschied und unter einander vermischt an, indem ich diese Kräfte nicht im physischen, sondern nur im mathematischen Sinne betrachte. Der Leser möge daher aus Bemerkungen dieser Art nicht schliessen, ... dass ich den Mittelpunkten (die geometrische Punkte sind) wirkliche oder physische Kräfte beilege, indem ich sage: die Mittelpunkte ziehen an.

(Newton 1963, 25)

(Newton ist hier nicht ganz aufrichtig. Auch wenn er selbst keine Ursachen für die Gravitationskraft angibt, so lehnt er zumindest Descartes Wirbeltheorie ab.)

Der revolutionäre Charakter der Principia liegt in der Einführung einer von allen physikalischen oder materiellen Ursachen befreiten Kraftkonzeption (vgl. Rosenberger 1895, 174). Die Newtonsche Kraft beschreibt in Form einer mathematischen Funktion die Wechselwirkung zweier Körper. Kraft ist keine Eigenschaft; sie ist nicht speicher- oder übertragbar (wie in der Impetustheorie). "Eine angebrachte Kraft ist das gegen einen Körper ausgeübte Bestreben, seinen Zustand zu ändern ... Diese Kraft besteht nur in dem Bestreben und sie verbleibt, nachdem sie dieses ausgeübt hat, nicht im Körper" (Newton 1963, 22). Kraft ist eindeutig der Wechselwirkung zugeordnet, nicht den wechselwirkenden Körpern. Kraft hat keine Anklänge mehr an Muskelanspannung oder andere körperliche Erfahrungen.

Das hohe Abstraktionsniveau der Newtonschen Trägheits-Kraft-Konzeption ist einerseits der Kulminationspunkt des galileisch-newtonschen Naturwissenschaftsverständnisses, andererseits macht es den Erwerb der Konzeption durch Schüler so schwer.

Physikalische Erkenntnisgewinnung ist ohne reichhaltige Erfahrungen in der Anfaß- und Vorzeigerealität nicht denkbar. Primäre Erfahrungen in ihrer ungeordneten Vielfalt bieten vielerlei Anstöße für die Ingangsetzung der physikalischen Erkenntnistätigkeit. Die theoretischen Entwürfe werden dann in einem, wie Simonis es genannt hat, "abstrakten Zwischenbereich" entwickelt, der sich

von den Zufälligkeiten und "Unreinheiten" der primären Erfahrungswelt in gedanklichen Ideationsprozessen emanzipiert hat. Für den Rückbezug der Entwürfe gibt es Transformationsregeln, die die gegebene Anfaß- und Vorzeigerealität einer physikalischen Behandlung zugänglich machen. Neben den Realisationshandlungen ist hier die Modellbildung zu nennen (z.B. die Modellierung eines ausgedehnten Körpers als materieller Punkt).

Wir haben versucht zu zeigen, daß der Übergang von der aristotelischen zur galileisch-newtonschen Physik, oder der Eintritt in den "abstrakten Zwischenbereich", sich auf eine ganz spezifische Weise vollzieht. Physik ist nicht eine exaktere und mathematisierte Formulierung der Begriffe, die man aus dem Alltag prinzipiell schon kennt. Und Physik besteht nicht in der genaueren und messenden Betrachtung dessen, was man schon immer gesehen hat. Physik schaut vor dem Hintergrund theoretischer Naturentwürfe anders ("mit anderen Augen") hin, und Physik verwendet ein konsistentes, durch mathematische Beziehungen ineinandergefügtes Begriffssystem, das sich in vielen Kernbegriffen von der Alltagssprache abgekoppelt hat, auch wenn die Verwendung gleicher Begriffswörter z.T. darüber hinwegtäuscht.

Einstein, der sich ausführlich mit erkenntnistheoretischen Problemen befaßt hat, differenziert folgendermaßen zwischen den Sprachsystemen der Wissenschaft und des Alltags:

Die Wissenschaft braucht die ganze Mannigfaltigkeit der primären, d.h. unmittelbar mit Sinneseindrücken verknüpften Begriffe sowie der sie verknüpfenden Sätze. In ihrem ersten Entwicklungsstadium enthält sie nichts weiter. Auch das Denken des Alltags begnügt sich im großen und ganzen mit dieser Stufe. Diese kann aber einen wirklich wissenschaftlich eingestellten Geist nicht befriedigen, da die so gewonnene Gesamtheit von Begriffen und Relationen der logischen Einfachheit völlig entbehrt. Um diesem Mangel abzuhelpen, erfindet man ein begriffs- und relationsärmeres System, welches die primären Begriffe und Relationen der "ersten Schicht" als logisch abgeleitete Begriffe und Relationen enthält. Dieses neue "sekundäre System" erkaufte die gewonnene höhere logische Einsicht mit dem Umstande, daß seine an den Anfang gestellten Begriffe (Begriffe der zweiten Schicht) nicht mehr unmittelbar mit Komplexen von Sinneserlebnissen verbunden sind.
(Einstein 1979, 67f)

Der Newtonsche Kraftbegriff trifft bei seiner unterrichtlichen Einführung auf das der "ersten Schicht" zugehörige Begriffscluster Kraft/Energie/Schwung/Wucht/... Er steht in der Gefahr, das Cluster lediglich um eine Facette zu erweitern, ohne die ihm zukommende eigenständige, abgegrenzte Funktion in einem physikalischen Begriffssystem zu erlangen. Der Prozeß der Aneignung des Newtonschen Kraftbegriffs und damit des zentralen Pfeilers der klassischen Dynamik, so weit sie auf der Schule vermittelt wird, verläuft dann erfolgreich,

wenn parallel dazu oder einleitend die Grundstruktur des galileisch-newtonschen Denkens erfaßt wird. Dazu gehört die Bewußtwerdung, daß zwischen Alltagsbegriffen und gleichklingenden physikalischen prinzipielle Unterschiede bestehen. Diese werden oft nicht wahrgenommen. Auf den Punkt gebracht heißt die These: Der Newtonsche Kraftbegriff ist deshalb, wie alle Untersuchungen über Schülervorstellungen in Mechanik belegen, so schwer, weil er von den Schülern aus dem Alltagsgebrauch von "Kraft" für bereits bekannt gehalten wird.

Zur Stützung dieser These möchte ich zwei Belege anführen. Solomon (1983) fand in einer Studie an Schülern der Sekundarstufe I ("Is Physics easy?"), daß die Kenntnis der Alltagsbedeutungen von Energie, Arbeit usw. das Lernen der physikalischen Begriffe erschwert. Die lebensweltlichen Bedeutungen überdeckten zu leicht die physikalischen. Das Fach wurde von den Schülern im Vergleich zur Chemie als leichter bezeichnet, oft mit der Begründung, Physik sei "Common sense". Der schwächste Schüler der Gruppe war mit am stärksten davon überzeugt, "that physics is easy because it's about what you know". Schüler gingen in die "Falle" der lebensweltlichen Bedeutung, weil im Unterricht der Übergang von konkreten Beispielen zum idealisierten Physikbereich zu schnell vollzogen werde. Wir würden sagen, die Schüler bemerken gar nicht, daß die eingangs konkreten Beispiele nun unter dem andersartigen Blickwinkel der theoretischen Naturentwürfe galileisch-newtonscher Physik betrachtet werden.

Wir haben 152 Schülern eine Liste mit 19 Begriffen der Mechanik (von Geschwindigkeit bis Corioliskraft) vorgelegt und sie danach gefragt, wie schwer es ihnen persönlich gefallen sei, die Begriffe zu verstehen. Zum Begriff Kraft ergab die subjektive Selbsteinschätzung: 0 mal "sehr schwer", 11 mal "schwer", 62 mal "mittel", 65 mal "leicht" und 14 mal "sehr leicht". Auch ohne eine direkte Korrelation zu einem objektiven Verständnistest herstellen zu können, wage ich die Aussage, daß die Lernschwierigkeiten beim Kraftbegriff von den Schülern weit unterschätzt werden und daß viele der Schüler, die "leicht" oder "sehr leicht" angekreuzt haben, den Begriff nicht physikalisch korrekt gebildet haben. Sonst hätten die Ergebnisse zu den Denkaufgaben B1, B4 und B6 der Befragung DAM an der alle Schüler teilgenommen haben, anders ausfallen müssen. Die Schüler-selbsteinschätzungen stehen in guter Übereinstimmung mit dem Eindruck, den die Lehrer von den Schwierigkeiten der Schüler haben. Von den 10 Kurslehrern hielten nur 2 den Kraftbegriff für schwer erlernbar, 3 für mittelschwer und 5 für leicht. Vielleicht muß die obige These dahingehend ergänzt werden, daß der Kraftbegriff auch deshalb so schwer zu erwerben ist, weil er von den Lehrern für so leicht gehalten wird.

Doch kehren wir zum Ausgangspunkt des Abschnitts B zurück.

Machen wir den Versuch einer zusammenfassenden tabellarischen Gegenüberstellung der Kennzeichen einer aristotelischen und einer galileisch-newtonschen Zugangsweise zur Natur:

aristotelische Physik

Gegenstand der naturwissenschaftlichen Reflexion sind die unmittelbar erfahrbaren Phänomene der Lebenswelt.

Ziel der naturwissenschaftlichen Reflexion ist die Aufdeckung der letzten Ursachen des natürlichen Geschehens und der unterliegenden Zwecke.

Die Erfassung des Wesens der Natur gelingt nur dann, wenn der Forscher sich passiv beobachtend in die Natur hineinversetzt.

Experimente sind Eingriffe und Verzerrungen des eigentlichen Naturgeschehens. Sie tragen zur Erfassung des Wesens der Natur nicht bei.

Mathematik ist eine gedankliche Schöpfung des Menschen. Sie ist nicht geeignet, das Wesen der natürlichen Vorgänge zu beschreiben.

galileisch-newtonsche Physik

Die Naturwissenschaft muß sich von den Beschränkungen und Zufälligkeiten der unmittelbaren Sinneseindrücke befreien. Ihr Gegenstand sind die idealen Gestalten, die dem natürlichen Geschehen zugrundeliegen.

Ziel der naturwissenschaftlichen Reflexion ist die einfache funktionale Beschreibung der Prinzipien, auf denen das Naturgeschehen beruht.

Die Findung der Prinzipien, bzw. die Konstruktion der idealen Gestalten beruht auf einem aktiven gedanklichen Abstraktionsprozeß.

Experimente dienen der Überprüfung der Gegenstandsangemessenheit der theoretischen Naturentwürfe. Sie sind der Versuch, eine dem theoretischen Entwurf gemäße Realität zu schaffen.

Die Natur ist in der Sprache der Mathematik verfaßt und auch nur durch diese adäquat zu beschreiben.

Die Gegenüberstellung von aristotelischer und galileisch-newtonscher Physik ist nicht in allen Teilen relevant für das Verständnis von Schülerlernprozessen bzw. von Lernschwierigkeiten. Dies gilt für die Einschätzung der Rolle von Experiment und Mathematik im physikalischen Erkenntnisprozeß. Das Vorverständnis der Schüler leidet nicht an zu geringem, sondern eher an übertriebenem Empirismus. Die Frage nach den letzten Ursachen und Zwecken des Naturgeschehens, die die aristotelische Physik umtrieb, beschäftigt Schüler nicht. Allerdings interessieren sie sich auch nur selten für die abstrakte funktionale Beschreibung von Vorgängen, wie Newton sie propagierte. Bei der Bewegung eines Autos (Anfahr- und Bremsvorgang) richten Schüler ihr Augenmerk weniger auf die physikalisch relevanten Wechselwirkungen als auf die technischen Ursachen (Motor, Bremsensystem). Eine newtonsche Behandlung der von der Straße auf das Auto ausgeübten Kräfte erscheint ihnen fremd (vgl. Punkt B.3.2.3.2; vgl. Jung 1981a, 176ff).

Der entscheidende Fortschritt des galileisch-newtonschen Denkens, den wir in unserer Abhandlung besonders hervorgehoben haben, nämlich die Anfertigung theoretischer Entwürfe für das Naturgeschehen auf der Grundlage idealer Gestalten, ist didaktisch von großer Bedeutung. Bevor wir uns der didaktischen Relevanz der geschichtlich-wissenschaftstheoretischen Betrachtung des Übergangs zu Galilei und Newton zuwenden, sei abschließend Simonis (1974, 207) zitiert, der noch einmal den Kernpunkt der modernen Physik herausarbeitet.

Die eigentliche Leistung der ersten Männer der neuzeitlichen Naturwissenschaft bestand (darin), ... das Auge gleichsam von den Phänomenen und ihrer, sei es wirklichen, sei es vermeintlichen Evidenz abzuwenden und die Wahrheit dieser Phänomene gerade nicht an deren sichtbarer Oberfläche, aber auch nicht nur in letzten metaphysischen Prinzipien und Gründen, sondern in einem "abstrakten Zwischenbereich" zu suchen, für den eben nur eine unanschauliche, "unnatürliche" Theorie eintreten kann.

D.3.6

Didaktische Relevanz der Ergebnisse

Wir haben ausführlich den Übergang von der aristotelischen zur galileisch-newtonschen Physik diskutiert und die Charakteristika der neuen Methode der Naturerfassung herausgearbeitet. Kehren wir nun zur Eingangsthese VII zurück:

Die Schwierigkeiten von Schülern beim Lernen von Physik liegen z.T. darin begründet, daß sie den Übergang von einer aristotelischen zu einer galileisch-newtonschen Natursicht nicht vollzogen haben und die neue Vorgehensweise der Physik nicht verstehen, bzw. ihren Sinn bezweifeln.

Die These ist vor dem Hintergrund der Ergebnisse von Abschnitt D.5 zu präzisieren, denn in manchen Bereichen ist das Denken von Schülern keineswegs aristotelisch zu nennen (siehe vorige Seite). Die Probleme der Schüler bei der Aneignung eines galileisch-newtonschen Naturzugangs liegen im Bereich mechanischer Phänomene spezifisch bei der Akzeptanz theoretischer Naturentwürfe unter Verwendung idealer Gestalten, die die unmittelbare Wahrnehmung transzendieren. Relevant sind dafür die Denkrahmen D1 "Realisationsdenken", D3 "Physik beschreibt ideale Laborwelten" und D4 "Physik liefert eindeutige Ergebnisse". Wir wollen die Bedeutung der wissenschaftstheoretischen Erörterungen für den Physikunterricht an zwei Gruppen von Daten aus den empirischen Erhebungen zum Schülervorverständnis ausführen:

- an Schüleraussagen zum Sinn von stark idealisierenden Randannahmen und von Gedankenexperimenten im Mechanikunterricht
- an Schüleraussagen zum Gehalt des ersten Newtonschen Axioms

D.3.6.1 Schüleraussagen zum Sinn von Abstraktionen und Gedankenexperimenten

Im Test MdP ("Methodik der Physik") der zweiten Großbefragung (siehe Punkt B.2.2.2) wurde die folgende Frage gestellt:

"Im Physikunterricht wird oft mit Annahmen und Gedankenexperimenten gearbeitet, die augenscheinlich nicht realisierbar sind (z.B. Ausschluß des Luftwiderstands und anderer Reibungseffekte oder Annahme einer unendlich lange andauernden geradlinigen Bewegung).

Halten Sie diese Vorgehensweise für sinnvoll oder nicht sinnvoll? Begründen Sie Ihre Antwort!"

Die Meinung der Schüler zu diesem Problem war einmütig. 83% der Antwortenden (N = 254) bezeichneten die beschriebene Vorgehensweise als sinnvoll, nur 11% als nicht sinnvoll. Unterschiede zwischen Leistungs- und Grundkursen, bzw. zwischen Jungen und Mädchen bestanden nicht. Mehr als die Hälfte der Antworten enthielten ausgeführte Begründungen.

Die Widerstände, bzw. Vorbehalte gegen die Vornahme von Ideationen des genannten Typs sind, besonders bezüglich der Ausklammerung von Reibungseffekten, nach den Ergebnissen der Analyse von Unterrichtsprotokollen und schriftlichen Tests bei Schülern größer, als sich das in den 11% ablehnenden Stellungnahmen ausdrückt (vgl. Punkt B.3.2.1.1 "Realisationsdenken"). Die Einwände, die im Unterricht an konkreten Phänomenen geäußert werden und die oft indirekter Art sind (z.B. Festhalten an Reibungseffekten), wurden in der schriftlichen Befragung nur selten explizit formuliert.

Die globalen Prozentzahlen sind daher von geringerer Bedeutung als eine Analyse der Antwortbegründungen. Aus der Art der Begründungen können qualitative Rückschlüsse auf das Verständnis der Funktion von idealen Gestalten im physikalischen Erkenntnisprozeß gezogen werden.

Bei den Befürwortungen dominierten die Argumentationstypen 1 bis 3:

1. Die Vorgehensweise ist sinnvoll, weil die Behandlung der Phänomene ohne Idealisierungen zu komplex werden würde.

"Ich halte sie in den ersten Jahren des Physikunterrichts für sinnvoll, denn zu diesem Zeitpunkt wäre es verwirrend, wenn man diese Effekte in die verschiedenen Aufgaben mit einbeziehen würde."

"Ich halte dieses für sinnvoll, da man an diesem Beispiel besser etwas erklären kann (obwohl es unreal ist). Manche Erklärungen würden sonst viel zu kompliziert werden."

2. Die Vorgehensweise ist sinnvoll, weil dadurch der Kern eines Phänomens herausgearbeitet wird.

"Ich halte diese Vorgehensweise für sinnvoll, weil man wenigstens die Grundzüge der Prinzipien verstehen muß! Über Realisierbarkeit oder Nichtrealisierbarkeit kann man hinterher sprechen."

Wenn man verschiedene Dinge (Kräfte ...) nicht vernachlässigen würde, könnte man Probleme nur schwer, umständlich und sehr genau untersuchen. Bei jedem Körper und an jedem Ort hätte man verschiedene Ergebnisse. Die Physik interessiert aber nicht der Einzelfall, sondern allgemeingültige Ergebnisse."

"Die Annahmen vereinfachen die Sachverhalte nur. Sie verdeutlichen zudem die schwierigen Vorgänge in der Natur. Bei der Auswertung kommt es auf das Prinzip an, und dies ist bei solcher Rechenweise klar nachweisbar. Die zuerst unwirklich wirkenden Annahmen dienen nur der Vereinfachung und Verdeutlichung."

3. Die Vorgehensweise ist sinnvoll, weil die Rechnungen/Formeln sonst zu kompliziert werden.

"Sinnvoll, sonst werden die Rechnungen noch komplizierter."

"Ich halte dieses Vorgehen für sinnvoll, denn in manchen Rechnungen ist es wesentlich einfacher, zu den gewünschten Ergebnissen zu kommen, wenn man z.B. den Luftwiderstand außer acht lassen kann. Dadurch kann man das Vorgehen erst an vereinfachten Beispielen üben und verstehen, um es dann später zu erschweren."

Begründungen des Typs 2 deuten auf ein Verständnis der Aufgabe von Ideationen im physikalischen Erkenntnisprozeß hin. Auch die Begründungstypen 1 und 3 sind plausibel. Bei ihnen schwingt jedoch ein Gesichtspunkt mit, der aufhorchen lassen sollte. Ich sehe die Gefahr, daß zugunsten der Einfachheit von idealisierten Betrachtungen der Anspruch der Physik auf die Fähigkeit zur Ordnung konkreter Erfahrung aufgegeben wird. Ein Schüler schrieb: "Im Grunde ist es nicht sinnvoll, da es aber unter realen Bedingungen kompliziert ist, ist es besser so". Ideale Gestalten sollen keine Ersatzwelt schaffen, die aufgrund ihrer Einfachheit zu einem Gegenstand-an-sich wird, sondern sie sind Hilfsinstrumente für das Zurechtfinden in der gegebenen Erfahrungswelt. Auffällig ist die Überbetonung des Rechenaspekts in den Schülerantworten. Bei vielen scheint aus dem Unterricht der Eindruck entstanden zu sein, Physik erschöpfe sich in der genauen Berechnung von Zahlenwerten, zur Not werde die Realitätsnähe eines Phänomens zugunsten seiner Berechenbarkeit aufgegeben. Auch wenn für komplexe lebensweltliche Phänomene keine exakten quantitativen Voraussagen gemacht werden können, so ermöglicht gerade die gedankliche Zerlegung des Komplexen das Prinzipverstehen. Galilei schloß seine Untersuchungen zum freien Fall nicht mit dem Vakuum-Gesetz ab. Er schloß Überlegungen zum Einfluß des Mediums, der Oberfläche des fallenden Körpers usw. an. Er wollte eine Beschreibung entwerfen, mit der die realen Fallbewegungen "genauer übereinstimmen als mit den Überlegungen des Aristoteles". Bleibt man im Unterricht beim idealen Fall stehen, so darf man sich nicht wundern, wenn die physikalische Beschreibung für nicht besonders realitätsrelevant gehalten und schnell wieder durch eine aristotelische (Fallgeschwindigkeit prop. zum Gewicht) ersetzt wird.

Als weitere Pro-Argumente traten auf:

4. Die Vorgehensweise ist sinnvoll, weil die Abweichungen zur Realität gering sind.

5. Die Vorgehensweise ist sinnvoll, denn im Weltraum gibt es solche Bedingungen, bzw. die Technik könnte sie einmal realisieren.

"Ich finde sie sinnvoll, weil man sich mit diesen Annahmen besser vorstellen kann, wie z.B. im Weltraum (wo kein Luftwiderstand etc. ist) Dinge vor sich gehen, die es auf der Erde nicht gibt."

6. Die Vorgehensweise ist sinnvoll, weil der physikalische Erkenntnisfortschritt

auf Idealisierungen und Gedankenexperimenten beruht.

"Es ist sinnvoll, weil man nur so die Zusammenhänge wirklich verstehen kann. Alle großen Entdeckungen sind durch Gedankenexperimente gemacht worden."

"Ich finde es sinnvoll, da man manchmal ja nur Vermutungen anstellen kann und erst hinterher durch Versuche und Experimente herausfinden kann, ob die Vermutung stimmt oder nicht. Ohne Annahmen und Gedankenexperimente hätte man in der Physik bestimmt noch nicht so viel herausgefunden."

Begründungstyp 6, der nur von wenigen Schülern geäußert wurde, drückt ebenso wie Typ 2 ein Verständnis der naturwissenschaftlichen Methode aus. In Typ 5 werden die Ideationen als unmittelbare, wenn auch nur unter ganz bestimmten Bedingungen gegebene Realität genommen. Zum Verständnis "irdischer" Verhältnisse werden sie nicht genutzt. Das läuft auf eine Trennung von "Erdsphysik" und "Weltraumphysik" hinaus, die wir auch in unserem zweiten Beispiel antreffen werden.

Widmen wir uns nun den Schülern, die Widerspruch gegen die in der Frage geschilderte Methode einlegen. Unter Begründungstyp 7 finden wir Einwände, die aristotelisch genannt werden können.

7. Die Vorgehensweise ist nicht sinnvoll, weil solche Bedingungen nicht realisierbar sind.

"Ich halte diese Vorgehensweise für nicht sinnvoll, da dort über Möglichkeiten diskutiert wird, die für uns Menschen auf der Erde nie realisierbar werden. Dieses wird genauso unwahrscheinlich werden, wie der Bau eines Perpetuum mobile, da dieses auch eine unendlich lange geradlinige Bewegung sein muß."

"Ich halte diese Vorgehensweise für nicht sinnvoll, da die extremen Verhältnisse (oben unter "z.B." aufgezählt) nicht oder nur selten der Wirklichkeit entsprechen. Dem Schüler scheint das schwer verständlich. Um ihm etwas klarzumachen, sollte man doch äußere Umstände nehmen, die der Realität entsprechen."

"Diese Vorgehensweise halte ich nicht für sinnvoll. Statt dessen sollten Versuche durchgeführt werden, die wirklichkeitsgetreuer sind. Den Ausschluß des Luftwiderstandes gibt es nicht in der Natur. Wozu sollte man dann berechnen, wenn es ihn nicht gäbe. Versuche für Schüler sollten realistischer sein."

"Ich halte sie nicht für sinnvoll. Man kann zwar leichter damit rechnen, aber was hat man davon, auszurechnen, wie schnell eine Kugel wäre, wenn kein Luftwiderstand da wäre?"

Die Einwände können aus enttäuschten Erwartungen resultieren. Ein Physikunterricht, der bei Ideationen stehenbleibt und deren Nutzen für das Verstehen realer Umwelten unterschlägt, provoziert die Frage nach dem Sinn der physikalischen Erkenntnisgewinnung. Die Berechnung des Abwurfpunkts x einer Rettungsboje

aus einem in der Höhe y mit der Geschwindigkeit v fliegenden Flugzeug verkommt bei Ausschluß des Luftwiderstands zu einer reinen Rechenübung. Kritik von Schülern an solchen "Beispielen" ist berechtigt. Sie kann zum Ausdruck bringen, daß die Hoffnung auf einen Beitrag der Physik zum Verstehen der natürlich-technischen Umwelt gerade nicht aufgegeben worden ist (vgl. Denkr. 2).

Doch auch diese Schüler werden erkennen müssen, daß die Physik die Hoffnung nur auf eine spezifisch physikalische Weise einlösen kann. Der Weg führt über die theoretischen Naturentwürfe und die "reinen" Phänomene - allerdings als Strukturierungshilfen, nicht als Endresultat oder Selbstzweck. Die Verdeutlichung dieses genuin physikalischen Zugangs zur Anfaß- und Vorzeigerealität ist Aufgabe des Unterrichts. Er hat sie verfehlt, wenn die Schüler den Eindruck gewinnen, die Aussage "Alle Körper fallen gleich schnell" sei die einzige Aussage der Physik zum freien Fall. Ein Mittel der Verdeutlichung ist die Offenlegung, ob ein behandeltes Phänomen der Theoriebildung bzw. der Illustration eines Formalismus dient (wie etwa der waagerechte Wurf im Vakuum) oder ob es um die Klärung eines konkreten Phänomens der Anfaß- und Vorzeigerealität geht. Die gegensätzlichen Intentionen von Theoriebildung und -anwendung werden im Unterricht zu wenig thematisiert.

Einwände des Typs 7 können dazu führen, daß Schüler sich gar nicht erst auf Gedankengänge einlassen, die auf Ideationen beruhen. Die Befassung mit theoretischen Entwürfen wird verdeckt oder offen abgelehnt. Das Augenmerk wird statt dessen von vornherein auf die Probleme gerichtet, die entstehen, wenn die Entwürfe praktisch realisiert werden sollen. In Fallstudie 1 zeigen wir dafür ein Beispiel aus der Unterrichtspraxis (siehe Punkt E.2).

8. Die Vorgehensweise ist nicht sinnvoll, weil man sich so etwas nicht vorstellen kann.

"Viele Schüler können sich in solche Situationen nicht reindenken. Und es ist dann schwer für sie, einer solchen Annahme zu folgen."

"Durch diese Annahme können sehr viele Mißverständnisse entstehen. Ist leider nicht zu ändern."

"Nicht sinnvoll, da oft die Vorstellungskraft der Schüler zu sehr beansprucht wird."

Einwände des Typs 8 bestätigen Ergebnisse der Wortprotokollanalyse und von Gesprächen mit Schülern. Manchen fällt es schwer, Idealisierungen gedanklich nachzuvollziehen. Für sie wird die Behandlung eines Phänomens bei Idealisierung nicht leichter sondern schwerer. Sie sind von den Schülern zu unterscheiden, die lediglich den Sinn von Idealisierungen bezweifeln (Typ 7).

Es lassen sich aus den Ergebnissen vier Grundmuster von Einstellungen gegenüber dem Arbeiten mit idealen Gestalten im physikalischen Erkenntnisprozeß unterscheiden und mit dem thematischen Vorverständnis zur Mechanik in Beziehung setzen:

- A) Die Befassung mit idealen Gedankenkonstrukten und reinen Phänomenen wird offen oder verdeckt abgelehnt.

"Das gibt es ja nirgends - warum soll ich mich damit beschäftigen?!"

Diese Haltung korrespondiert mit dem "Realisationsdenken" (Denkrahmen 1), d.h. der Disposition zum Durchdenken auch abstrakter Probleme in vorgestellten alltagsnahen Realisierungen des Prozeßverlaufs.

- B) Idealisierte Betrachtungen werden hingenommen, ohne daß ihre Funktion im Erkenntnisprozeß erfaßt wird.

"So ist das einfacher."

"Die Formeln werden leichter. Man kann das besser berechnen."

Der bei diesen Antworten fungierende Denkrahmen ist D8 "Formelfixierung": Einschätzung physikalischer Kompetenz als Fähigkeit zur Anwendung von Formeln.

- C) Ideale Gestalten werden zu einer eigenen Realität erhoben. Der Bezug zur Erfahrungswelt geht verloren. Das entspricht dem Denkrahmen 3 "Physik beschreibt ideale Laborwelten".

Neben den Schülern, die auf ideale Bedingungen im Weltraum verweisen, ist hier die große Gruppe der Schüler zu nennen, die vom Umgang mit Laborgeräten und von der Handhabung physikalischer Formalismen fasziniert sind. Die Eigendynamik der Disziplin Physik überdeckt die Bezüge zur Erfahrungswelt. Stellvertretend für diese Einstellung zitieren wir die Aussage eines Schülers zu Teil C des Tests VWP der ersten Großbefragung (siehe Seite 116):

"Ich habe dieses Fach aus Interesse gewählt und nicht, um meine Erkenntnisse in diesem Fach zu verwerten. Ich muß ja nicht unbedingt alles, was ich lerne, auf die Realität beziehen und gleich umsetzen. Genauso ist es bei mir in der Mathematik und Chemie."

- D) Ideale Gestalten werden in ihrer Funktion als Strukturierungshilfen für die Anfaß- und Vorzeigerealität verstanden.

"So wird die Grundidee eines Vorgangs herausgearbeitet."

"Die Prinzipien des Naturgeschehens werden verdeutlicht."

Wir sehen in diesen Aussagen Gegenbeispiele zum Denkrahmen 1 "Realisationsdenken".

Die Reihenfolge A bis D ist nicht als wertende Rangfolge zu verstehen. Wir haben bereits darauf hingewiesen, daß Haltung A die begrüßenswerte Forderung an die Physik zugrundeliegen kann, etwas zum Verstehen tatsächlicher Vorgänge beizutragen (Denkrahmen 2: "Aufgabe der Physik: Realitätserfahrungen erklären"). In Einstellung B könnte dieser Anspruch bereits aufgegeben worden sein. Die resignative Rückzugposition hieße überspitzt: "Hauptsache, es ist alles möglichst einfach, auch wenn es mit der Realität kaum noch etwas zu hat". Einstellung C gehört sicherlich zum Vorverständnis mancher Wissenschaftler und wird daher kaum kontraproduktiv für physikalische Kompetenzentwicklung sein. Sie führt bei Schülern zumindest dazu, sich mit idealen Gestalten zu beschäftigen. Sie kann aber auch bewirken, daß der Anwendungsbereich physikalischer Erklärungsmuster auf die Laborwelt beschränkt bleibt, während die Phänomene der Alltagswelt nach dem Muster der Alltagstheorien strukturiert werden. Einstellung D halte ich im Hinblick auf das Lernen von Physik als einer alternativen Sichtweise der Welt, d.h. als einer zusammenhängenden Ordnungsstruktur für die Vielfalt der Einzelerfahrungen, für besonders fruchtbar. (Alternativ ist die physikalische Sichtweise z.B. im Vergleich zu einer künstlerischen oder technischen.)

Die von den Schülern formulierten Begründungen stammen überwiegend aus Bereich B. Abschätzungen über die Verteilung der Einstellungen A bis D sind auf der alleinigen Grundlage von Test VWP kaum zu treffen. Es ist jedoch in jedem Fall wichtig, den Sinn von idealen Gestalten und reinen Phänomenen im Physikunterricht der Sekundarstufe II zu thematisieren. Hier geht es nicht allein um das Lernen über Physik, sondern unmittelbar um das Lernen von Physik, denn bei einer ablehnenden Haltung gegenüber theoretischen Naturentwürfen oder einer Unterschätzung ihrer Bedeutung ist der physikalische Zugang zur Natur verbaut.

D.3.6.2

Schüleraussagen zum ersten Newtonschen Axiom

In unserer These VII haben wir einen Zusammenhang hergestellt zwischen Lernschwierigkeiten in der Mechanik und grundsätzlichen Problemen mit der Vorgehensweise der galileisch-newtonschen Physik. Wir wollen in unserem zweiten Beispiel belegen, daß die Relevanz des für das Verständnis der Newtonschen Dynamik so imminent wichtigen Trägheitssatzes von einigen Schülern deshalb unterschätzt wird, weil sie seine Aussage auf ideale Verhältnisse, wie sie z.B. im Weltraum herrschen, beschränkt sehen. Auf der Erde ("in der Realität", wie manche Schüler schreiben) gelte eigentlich, daß jede Bewegung einer antreibenden Kraft bedürfe. (Was noch keinen Widerspruch zur Newtonschen Dynamik darstellt, solange keine resultierende Antriebskraft gemeint ist.)

In einigen zitierten Schüleraussagen spiegelt sich die Vorstellung wieder, daß Kraft im Körper gespeichert wird, um eine Bewegung voranzutreiben und daß diese Kraft durch äußere Widerstände abgebaut wird. Solche Aussagen sind als Belege für die Nähe von Schülervorstellungen zur Impetustheorie zu werten, die wir zum Anlaß für die Darstellung früher Kraftvorstellungen in Abschnitt D.2 genommen haben. (Vgl. die Präkonzepte P3-1 und P3-2 zu Kraft und Bewegung).

Wir beziehen uns im folgenden auf Bearbeitungen der Aufgabe C (Teil a) des Tests DAM der ersten Befragung. Der Wortlaut:

"Lesen Sie die beiden folgenden Aussagen zur Bewegungslehre durch:

- I: 'Ein in Bewegung befindlicher Körper kommt zum Stillstand, sobald die Kraft, die ihn vorantreibt, nicht mehr in der für den Antrieb erforderlichen Weise wirken kann.'
- II: 'Jeder Körper behält eine ihm einmal verliehene Geschwindigkeit, solange er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Bewegungszustand zu ändern.'

Stellen Sie den prinzipiellen Unterschied zwischen den beiden Aussagen heraus! Verdeutlichen Sie durch Beispiele!"

Man erkennt in der Aussage II das erste Newtonsche Axiom und in Aussage I die aristotelische Bewegungslehre oder, wenn man davon ausgeht, daß die "vorantreibende Kraft" ihren Sitz im Körper selbst hat, eine Impetusvorstellung.

Gut 80% der Schüler (= 205 Schüler) haben die Aufgabe bearbeitet. Die Antworten weisen zahlreiche interessante Einschätzungen der Aussagen I und II auf. Es wurde die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Antwortmuster ausgezählt. Die genannten Prozentzahlen können nur grobe Anhaltspunkte sein, da die offenen

Antworten schwer zu klassifizieren waren.

1. Rund 13% der Schüler beschränken sich auf eine in etwa zutreffende Wiedergabe des Inhalts von Aussage I (Aristoteles) und II (Newton). Die Art der Wiedergabe variiert. Bei der Wortwahl zeigt sich das Begriffskluster "Kraft/Energie/Impuls/Schwung/..." (vgl. Präkonzept 3 "Kraft als allgem. Wirkungsfähigkeit").

"In II wird behauptet, ein in Bewegung befindlicher Körper bewegt sich immer weiter, falls er nicht gestoppt wird. In I heißt es, es müsse ständig neue Energie zugeführt werden, um einen Körper in Bewegung zu halten."

"I besagt, jede Bewegung verbraucht ständig Kraft. II besagt, jede Bewegungsänderung benötigt Kraft. (II ist richtig)."

"Bei I wird die Kraft verbraucht, bei II kann die Kraft nur aufhören zu wirken, wenn äußere Kräfte wie Luftwiderstand, Reibung wirken."

4% führen in ihren Antworten Argumente an, die Aussage I bestätigen, bzw. Aussage II widerlegen.

"Aussage I ist richtig, weil der Körper durch nichts mehr vorangetrieben wird. Wenn Aussage II richtig wäre, würde es ein Perpetuum mobile geben."

"Jeder Körper hat eine gewisse Trägheit. Wenn die wirkenden Kräfte aussetzen, kommt der Körper aufgrund der Trägheit irgendwann doch zum Stillstand. Er stoppt seine Bewegung nicht ruckartig (Trägheit), wenn keine Kraft mehr wirkt. Jeder Körper stoppt seine Bewegung nur, wenn die für den Antrieb erforderliche Kraft nicht mehr wirkt."

Die letzte Aussage erinnert an das natürliche Erschlaffen des Impetus. "Trägheit" wird in zwei Bedeutungen verwendet, einmal als "Ermüden" und einmal als langsames Reagieren auf den Wegfall der Antriebskraft. Die Vorstellung geht zurück auf die dominante Alltagserfahrung, daß jede Bewegung einmal zur Ruhe kommt. Diese sinnliche Erfahrung macht es so schwer, die geradlinig gleichförmige Bewegung als Idealtypus anzunehmen. Dadurch wird nämlich die "natürliche" Erfahrung, des Zum-Stillstand-Kommens erklärungsbedürftig. Es bedarf der Angabe einer konkreten Wechselwirkung. Reibungskräfte treten gleichberechtigt neben Antriebskräfte bei der Beeinflussung von Bewegungsverläufen.

Der folgende Schüler interpretiert Aussage I im Lichte Newtonscher Vorstellungen konstruktiv um und bringt die Aussagen I und II zur Synthese. (Annahme des Wirkens von Reibungskräften bei I.)

"Der erste Satz sagt aus, daß der Körper zum Stillstand kommt, wenn die Kraft, die ihn vorantreibt, aufhört. Es wirken also Kräfte auf ihn ein, die ihn zum Stillstand zwingen. Beide Sätze sagen somit das gleiche aus."

Deutlich mehr Schüler (13%) sprechen sich für II, bzw. gegen I aus.

"Die zweite Aussage ist richtig. Beispiel dafür, daß die erste Aussage nicht zutrifft:

1. Eine gleichförmige Bewegung ist kräftefrei, d.h. der erste Satz ist nicht auf diese Bewegung anwendbar, da keine Kraft einen Vortrieb bewirkt. 2. Luftkissenbahn: Der Körper mit der Masse m wird durch die Kraft F gleichmäßig beschleunigt. Ab einem gewissen Zeitpunkt wirkt F nicht mehr, die Bewegung wird jedoch zu einer gleichförmigen. Folgefall: Widerspruch zur ersten Theorie."

2. In einigen Fällen ist die Zustimmung zu II gekoppelt mit der Einschränkung, die Aussage sei richtig, gelte aber nur für einen idealen reibungsfreien Zustand, speziell im Weltraum, während I der Realität entspreche.

"II ist richtig, in der Realität ist es aber so wie in I, denn die Reibung kann nicht aufgehoben werden, und deshalb verlangsamt sich der Körper."

Die Trennung, nach der I die realen Verhältnisse beschreibt und II nur für den reibungsfreien Fall gilt, findet sich bei etwa einem Fünftel der Schüler.

"I ist praxisbezogen. II ist Theorie und gilt nur für einen reibungsfreien Raum (bzw. daß keine anderen Kräfte auf den Körper mehr einwirken)."

I: Ein Körper bewegt sich so lange, bis die in den Wagen hineingesteckte Kraft verbraucht ist (Wärme, Reibung etc.).

II: Ein Körper würde sich konstant bewegen, wenn keine äußeren Ursachen oder Kräfte auf das System einwirken würden.

I: Realität, II: Nur im Weltraum."

"Satz II bewahrheitet sich nur in Systemen, in denen es keine Reibung gibt. Im Weltraum, in dem kein Luftwiderstand vorhanden ist, würde Satz II stimmen. Wenn man die Reibung mit in die Betrachtungen einbezieht, ist Satz I wahr. Beispiel: Ein Ball wird durch einmaliges Anstoßen zum Rollen gebracht. Durch die Reibung kommt er irgendwann zum Stillstand."

Das Verständnis des Trägheitssatzes (Aussage II) als "nur auf den Weltraum bezogen" halte ich für bedenklich (zumal Impulsänderungen durch Gravitationskräfte den Schülern offensichtlich nicht in den Sinn kommen). Das verleitet dazu, den Gehalt des Trägheitssatzes als nicht relevant für irdische Verhältnisse anzusehen und damit seine zentrale Stellung zu verkennen, die in dem Entschluß besteht, jede Änderung des Bewegungszustandes auf das Wirken von Kräften zurückzuführen (vgl. Denkrahen 3 "Physik beschreibt ideale Laborwelten").

Die Schüler beschränken ihre Wahrnehmung der Aussage I auf den kräftefreien Fall - "kräftefrei" verstanden als Fehlen jeglicher Einzelkraft. Manche Schüler schrieben, nach Aussage II müßte ein Stein, den man fallen läßt, in der Luft schweben bleiben. Vielleicht kann man durch eine Umformulierung des Trägheitssatzes dieser falschen Schwerpunktsetzung entgegenreten:

"Ein Körper ändert seinen Bewegungszustand dann, wenn eine resultierende Kraft an ihm angreift. Ist die Vektorsumme aller angreifenden Kräfte Null, behält der Körper seinen Bewegungszustand bei."

Der Übergang vom Aristotelischen zum Newtonschen Kraftbegriff besteht, wie wir oben ausgeführt haben, in dem Entschluß, alle Bewegungsänderungen auf Kraftwirkungen zurückzuführen. Die Impulserhaltung bei Kräftefreiheit ist nur eine andere Formulierung des gleichen Denkprinzips. Für die Beschreibung von Alltagsbewegungen liegt der Schritt in der Konzeptualisierung von Reibung als gleichberechtigter "Bewegungskraft". Der kräftefreie Fall kann nun neu gedeutet werden: Sind Antriebskraft und Reibungskraft entgegengesetzt gleich groß, dann behält der Körper seinen Bewegungszustand bei. Dies ist ein Sonderfall. In der Regel gibt es eine resultierende Kraft ungleich Null. Die Aussage, daß zum Aufrechterhalten einer Bewegung eine Antriebskraft (als Einzelkraft) von Nöten ist, ist in diesem Verständnis in vollkommener Übereinstimmung mit der Newtonschen Theorie. Ja, erst in dieser Sichtweise tritt die Bedeutung des Trägheitssatzes für die Anfaß- und Vorzeigerealität klar hervor und wird die Einsicht in den Nutzen idealer Gestalten wie der unendlich andauernden geradlinig-gleichförmigen Bewegung gefördert.

3. Nur wenige Schüler (unter 5%) formulieren den Unterschied zwischen den Aussagen I und II explizit im Sinne des zuletzt Gesagten.

"I: Es wird hier von vornherein festgestellt, daß die Gegenkraft größer wird als die Antriebskraft.

II: Diese Aussage ist allgemeingültig, ob mit Reibung (Gegenkräfte) oder im Vakuum ohne Gegenkräfte."

"Die erste Aussage setzt voraus, daß keine anderen Kräfte auf den Körper wirken, als die Antriebskraft und eine Kraft, die eine ihr entgegengesetzte Richtung hat. Sie setzt ebenfalls voraus, daß diese entgegengesetzte Kraft proportional zur Geschwindigkeit des Körpers ist, oder daß sie bei einer "Nullgeschwindigkeit" ($v = 0$) ebenfalls 0 ist. Die zweite Aussage geht von keinen speziellen Zuständen aus und erhebt daher Anspruch auf Allgemeingültigkeit."

"Theorie I setzt die Reibungskraft als immer gegeben voraus. Sie ist in der Antriebskraft nicht enthalten. Theorie II berücksichtigt eine Reibungskraft als einwirkende Kraft. Für reibungsfreie oder nicht reibungskonstante Bewegungen ist Theorie I nicht geeignet. Außerdem müßte die Trägheit als Kraft gelten, um richtige Ergebnisse zu erzielen."

Diese Schüler erkennen die Funktion des Trägheitsgedankens als analytisches Instrument zur Ordnung der Bewegungsformen. Der Trägheitssatz wird in seiner vollen Bedeutung auf reale Bewegungen bezogen. Der reibungsfreie Fall ist als Denkmöglichkeit verfügbar.

Schüler, die so oder ähnlich den Unterschied zwischen I und II herausarbeiteten, zeigten bei den Denkaufgaben des Tests DAM eine deutliche Tendenz zu korrekten Lösungen. Ich werte das als Indiz für einen Zusammenhang zwischen der Fähigkeit zur bewußten Unterscheidung zwischen dem Newtonschen und dem

Aristotelischen Kraftbegriff, bzw. dem der Impetustheorie (die Schüler brauchen diese Bezeichnungen natürlich nicht zu kennen), und einem echten Verständnis des Newtonschen Konzepts.

4. Die Zustimmung zu Aussage II erfolgte bei einigen Schülern vor dem Hintergrund der Vorstellung, wenn keine anderen Kräfte auf einen Körper einwirkten, bliebe "dessen Kraft" erhalten. Die Antriebskraft wird hier verstanden als Kraft, die im Körper, bzw. auf ihn übergegangen ist (vgl. Präkonzept 3-1).

"Aussage II sagt, daß die Kraft im Körper bleibt."

"Im Prinzip sind die Theorien gleich, denn eine Kraft, die einen Körper vorantreibt, wird durch andere einwirkende Kräfte gemildert, bzw. gestilgt. Die Kraft kann nach I insofern nicht mehr wirken, indem sie von den Kräften von II aufgehoben wird."

Abschließend möchte ich nicht versäumen, eine besonders kreative und eine pragmatische Antwort zu zitieren:

"Beim ersten Beispiel ist ein Körper gemeint, der durch eine Energiequelle angetrieben wird, wie z.B. ein Elektromotor, der von einer Batterie betrieben wird. Beim zweiten Beispiel ist auch eine Energiequelle, die einen Körper antreibt, gemeint, allerdings ist hier der Energiespender keine gespeicherte Energie, sondern eine dauernd wirkende Energie, wie z.B. die Sonne."

"Prinzipieller Unterschied: Theorie II ist das zweite Newtonsche Axiom und stimmt somit. Theorie I kommt wohl von Ihnen und kann somit nicht stimmen."

D.4 Zur Entwicklung des Kraftbegriffs nach der Veröffentlichung
 von Newtons 'Principia'

Im letzten Abschnitt unserer historisch-wissenschaftstheoretischen Ausführungen zur Genese des Kraftkonzepts werden wir die Aufnahme des Newtonschen Kraftbegriffs durch die Forschergemeinschaft beleuchten und herausarbeiten, daß parallel zum Newtonschen andere Kraftkonzepte verfolgt wurden. Die Entwicklung eines klaren Bewußtseins über die unterschiedlichen konzeptuellen Bedeutungen eines Relationsbegriffs "Kraft" zur Beschreibung von Wechselwirkungen, bzw. äußeren Einwirkungen auf Körper und eines Substanzbegriffs "Energie", der die Überzeugung von der Existenz einer gewissen mengenartigen Größe ausdrückt, die bei allen Vorgängen in der Natur insgesamt erhalten bleibt, fand erst im 19. Jahrhundert ihren Abschluß.

Bekanntlich setzte sich das Wort "Energie" erst ab Mitte des 19. Jahrhunderts allmählich in der Physik zur Bezeichnung der zweiten Größe durch. Die Redeweise von der "Erhaltung der Kraft" findet sich noch in Lehrbüchern vom Ende des 19. Jahrhunderts (z.B. Dühning 1887). (Helmholtz nannte seine bahnbrechende Arbeit von 1847 "Über die Erhaltung der Kraft".) Man kann das als Verwendung des gleichen Wortes für verschiedene begriffliche Konstrukte einstufen, wie Hermann (1983, 157) das tut, wenn er meint, durch die Einführung von "Energie" seien die "ewigen Verwechslungen mit 'Kraft' im Newtonschen Sinne ausgeschlossen" worden. Das würde voraussetzen, daß auf der Inhaltsseite schon vorher Klarheit darüber geherrscht hat, was man jeweils meinte, wenn man von "Kraft" sprach (Kraft oder Energie), und Verwirrung lediglich durch die ungeschickte Verwendung des gleichen Begriffswortes entstand. Wir schließen uns diesem Standpunkt nicht an. Unsere These lautet, daß bis ins 19. Jahrhundert hinein darüber diskutiert wurde, welcher Kraftbegriff physikalisch der geeignetste sei, um das Geschehen in der Natur zu beschreiben. Das Newtonsche Konzept wurde vorwiegend als mathematischer Formalismus anerkannt. Die Suche nach einem adäquaten physikalischen Kraftbegriff ging weiter. Die Aussage Newtons, daß Kraft nur während ihrer Ausübung bestünde und danach nicht im beeinflussen Körper verbleibe, konnte die tiefe metaphysische Überzeugung von der Existenz einer Erhaltungsgröße "Kraft" nicht befriedigen. Das Festhalten an der Krafterhaltung führte in der Mitte des 18. Jahrhunderts zur Formulierung des universellen Energieerhaltungssatzes.

Beginnen wir die Erörterungen mit einem Abriß des Aufbaus und der Inhalte von Newtons "Prinzipien der Naturlehre" ('Principia').

D.4.2

Erörterung

Die 'Principia' beginnen mit der Erklärung der Begriffe "Größe der Materie" (Dichte mal Volumen), "Größe der Bewegung" (Masse mal Geschwindigkeit: Impuls), "Kraft der Trägheit" ("Vermögen zu widerstehen"), "Kraft" (s.u.) und "Centripetalkraft" (Zentralkraft).

Es folgen Ausführungen zu den Begriffen Zeit, Raum, Ort und Bewegung, jeweils getrennt als "relative" und als "absolute" Größe. Newton postuliert die Existenz eines absoluten Raums, d.h. eines für alle Zeit festen Koordinatensystems, auf das die absoluten Bewegungen bezogen werden. Eine relative Bewegung vollzieht sich in einem Bezugssystem, das sich gegenüber dem absoluten bewegt. Dieser Gedankengang drückt die endgültige Aufgabe der Erde als "natürliches" Bezugssystem aus. Konstante Bewegungszustände sind nur dann wahrhaft konstant, wenn sie bezüglich des absoluten Raumes geradlinig gleichförmig verlaufen. Der absolute Raum ist ein reines, von allen real erfahrbaren Räumen vollständig losgelöstes Konstrukt. Nur wenn an einem Körper selbst eine Kraft angreift, ändert sich seine wahre Bewegung. Greift dagegen nicht am Körper, sondern am Bezugssystem eine Kraft an, so ändert sich nur die relative Bewegung (Schein-kraft).

Die Ursachen durch welche wahre und relative Bewegungen verschieden sind, sind die Kräfte, welche zur Erzeugung der Bewegung auf die Körper eingewirkt haben. Eine wahre Bewegung wird nur erzeugt oder abgeändert durch Kräfte, welche auf den Körper selbst einwirken, wogegen relative Bewegungen erzeugt und abgeändert werden können, ohne dass die Kräfte auf diesen Körper einwirken. Es genügt schon, dass sie auf den anderen Körper, auf welchen man diesen bezieht, einwirken. (Newton 1963, 28f)

Ich will hier nicht auf den bekannten Newtonschen "Eimerversuch" zur Unterscheidung relativer und wahrer Bewegungen eingehen (nur bei letzteren treten nach Newton Fliehkräfte auf). Wichtiger erschien mir die Erläuterung des Konzepts vom absoluten Raum, weil dadurch die Erklärung der geradlinig gleichförmigen Bewegung zur idealen Bewegungsform im ersten Axiom einsichtiger wird.

Die "Grundsätze oder Gesetze der Bewegung" lauten:

1. Gesetz: Jeder Körper beharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.

2. Gesetz: Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.

3. Gesetz: Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wir-

kungen zweier Körper auf einander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.

(Newton 1963, 32)

Die Axiome werden durch Erläuterungen und Zusätze weiter ausgeführt. In den Zusätzen findet sich das Superpositionsprinzip von Kräften, der Impulserhaltungssatz und der Satz von der Erhaltung des Schwerpunktimpulses.

Es schließt sich das 1. Buch an, in dem Newton aus angenommenen Bahnkurven (Kegelschnitte) die dafür erforderlichen Zentralkräfte bestimmt, bzw. bei vorgegebenen Zentralkräften die sich daraus ergebenden Bahnen erschließt. Dabei untersucht Newton neben der Proportionalität der Zentralkraft zu $1/r^2$ auch die Abhängigkeiten $1/r$ und $1/r^3$. Die Kraftwirkungen werden sowohl zwischen Massepunkten als auch zwischen ausgedehnten Körpern analysiert, wobei sich die Gesamtkraft aus der Summe der Einzelkräfte zwischen Teilkörpern ergibt.

Das 1. Buch erarbeitet die mathematischen Werkzeuge für die Beschreibung der Planetenbewegungen. Ihre Anwendung auf Beobachtungsdaten über die Bahnkurven von Himmelskörpern bleibt dem 3. Buch vorbehalten. Einleitend zu Buch 1 erläutert Newton die "Methode der ersten und letzten Verhältnisse". Es handelt sich um die geometrische Bestimmung der Grenzwerte von Strecken- oder Flächenverhältnissen. Die Methode entspricht inhaltlich der Infinitesimalrechnung, ihre geometrische Darstellungsform entbehrt jedoch der Eleganz und Einfachheit des uns geläufigen Formalismus. (Die Differentialquotienten der Form dv/dt wurden von Leibnitz entwickelt.) Für heutige Leser sind die mathematischen Deduktionen im 1. Buch der Principia schwer nachvollziehbar. Man findet in den Principia Gleichungen des Typs " $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ " ebensowenig wie im "Treatise on Electricity and Magnetism" die Maxwell'schen Gleichungen.

Im 2. Buch behandelt Newton Bewegungen in widerstrebenden Mitteln. Es werden Reibungskräfte angenommen, die linear oder quadratisch von der Geschwindigkeit abhängen. Des weiteren betrachtet Newton Probleme der Hydrostatik und Hydrodynamik. Im Hintergrund steht das Ziel der Widerlegung von Descartes Wirbeltheorie der Planetenbewegung. Newton kann zeigen, daß die Annahme, die Planeten würden durch ätherische Wirbelströmungen auf ihren Bahnen geführt, zu unauflösbaren Widersprüchen führt.

Das 3. Buch ("Vom Weltsystem") zeigt schließlich die physikalische Bedeutung der vorangegangenen "mathematischen" Demonstrationen.

In den vorhergehenden Büchern habe ich die Principien der Naturlehre dargestellt, jedoch nicht physische sondern nur mathematische, aus denen man nämlich in physikalischen Untersuchungen Schlüsse ziehen kann. Es sind das die Gesetze und Bedingungen der Bewegungen und

Kräfte, welche sich hauptsächlich auf die Naturlehre beziehen. (...) Es bleibt noch übrig, dass wir nach jenen Principien die Einrichtung des Weltsystems kennen lernen.
(Newton 1963, 379)

Newton faßt zuerst die Phänomene der empirischen Basis zusammen: Für die Bewegungen der Jupiter- und Saturnmonde, für die Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn sowie für den Erdmond gelten bei Bezug auf die jeweiligen Zentralkörper das zweite und das dritte Keplersche Gesetz. Diese Erscheinungen bringt Newton nun mit bestimmten "mathematischen Principien" zur Deckung, die er im 1. Buch entwickelt hat. Daraus resultieren Lehrsätze des Typs:

§. 1. Lehrsatz: Die Kräfte, durch welche die Trabanten des Jupiters beständig von der geradlinigen Bewegung abgezogen, und in ihren Bahnen erhalten werden, sind nach dem Mittelpunkte des Jupiters gerichtet und den Quadraten ihrer Abstände von demselben umgekehrt proportional.

Der erste Theil dieses Satzes ergibt sich aus der 1. Erscheinung und aus §. 14. oder §. 16. des ersten Buches, und der folgende Theil aus derselben Erscheinung und §. 18. jenes Buches.
(Newton 1963, 385)

Die berühmte Mondrechnung erbringt den Beweis, daß die Zentripetalkraft, die den Mond auf seiner Bahn um die Erde hält, mit der irdischen Schwere identisch ist. Damit ist unter dem Konzept der universellen Gravitation, oder der Schwere aller Körper gegeneinander, die Vereinigung von Himmelsmechanik und irdischer Mechanik vollzogen. Es folgen Sätze und Erläuterungen zum Mittelpunkt des Sonnensystems, zur Abplattung der Planeten an den Polen, zur Entstehung von Ebbe und Flut, zu den Störungen der Planetenbahnen durch dritte Körper, zu den Kometen und zu manchen anderen Erscheinungen.

Der kurze Inhaltsüberblick kann die Fülle der in den 'Principia' behandelten Probleme nur andeuten. Die Teile des Werks werden unterschiedlich gewichtet. Das 2. Buch wird in der Regel vernachlässigt (z.B. von Cohen 1960). In Schulbüchern gewinnt man den Eindruck, als läge der Schwerpunkt des Werkes auf den 3 Axiomen und der Definition des Kraftbegriffs. In der zeitgenössischen Rezeption des Werks hat eindeutig das dritte Buch im Vordergrund gestanden. Die 3 Axiome wurden viel weniger diskutiert als das, was Newton über die allgemeine Gravitation sagte, bzw. das was er über deren Ursache nicht sagte.

Rosenberger (1895) erwähnt bei seiner Auflistung der "Fundamente" der 'Principia' die drei Axiome nicht einmal. Nach seiner Darstellung konzentrierte sich die Aufnahme des Werks auf folgende vier Hauptaussagen:

1. Die Himmelskörper bewegen sich so, als ob sie von der geradlinigen Be-

wegung durch eine Kraft abgelenkt werden, die ihren Sitz im Zentralkörper hat und umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung ist.

2. Gravitation und irdische Schwere sind identisch.
 3. Die Anziehungskraft wirkt proportional zur Masse. Sie kommt jedem Körper im Universum zu. D.h. auch die Zentralkörper unterliegen der Gravitation. Prinzipiell kann man aus den wechselseitigen Einwirkungen der Himmelskörper aufeinander die Störungen der Bahnkurven berechnen.
 4. Die Planetenbewegungen lassen sich nicht durch ätherische Wirbelbewegungen erklären (entgegen der Auffassung Descartes).
- (vgl. Rosenberger 1895, 225f).

Der mathematische Apparat der Principia fand überall Anerkennung. Über die physikalische Bedeutung wurde gestritten. Dabei ging es wiederum weniger um den allgemeinen Kraftbegriff als um das Wesen und die Ursache einer speziellen Kraft, nämlich der Gravitationskraft.

Der mathematische Werth der Principien (ist) von Anfang an lebhaft anerkannt und Newton ist darnach direct als einer der grössten Mathematiker überall ohne Widerspruch gerühmt worden. Die physikalische Bedeutung der Principien, als den eigentlich revolutionären Charakter des Buches übersah man allerdings allgemein, weil derselbe von Newton theils künstlich versteckt, theils selbst noch nicht ganz mit Bewusstsein ergriffen und nur zwischen den Zeilen des Buches zu lesen war. (Rosenberger 1895, 224)

Einwände gegen die 'Principia' machten sich an verschiedenen Punkten fest:

- Grundsätzliche Gegensätze zwischen dem auf Kräften basierenden Weltbild Newtons und dem kinematischen Weltbild der Cartesianer.
- Kritik daran, daß Newton keine physikalische Erklärung der Gravitation, bzw. der Schwere lieferte (wie z.B. die Wirbeltheorie von Descartes).
- Die Annahme einer universellen Gravitation, die durch den leeren Raum wirkt, wurde entweder als physikalisch bedeutungslose Fiktion oder als Rückfall in den Okkultismus bezeichnet.
- Diskussion darüber, ob man Kraft als mathematische Relationsgröße dem Prozeß der Einwirkung zuordnen soll, oder ob man Kraft als physikalische Erhaltungs- und Austauschgröße den Körpern als Fähigkeit zur Einwirkung ("Fähigkeit zur Aktion") zuordnen soll.

Bezüglich des letzten Spiegelstrichs wurde der mathematische Sinn der Newtonschen Kraftbegriffs nicht bezweifelt. Doch sah man in ihn keine befriedigende Antwort auf die Frage nach den "Kräften der Natur". Newton selbst betont in den 'Principia', daß er lediglich "mathematische" Untersuchungen anstelle und über die physikalischen Ursachen der Kräfte (speziell der Gravitationskraft) keine

Aussagen mache. Wenn wir aus heutiger Sicht über "Kraft" sprechen ist die Frage geklärt. Der abstrakte "mathematische" Relationsbegriff Newtons ist zum physikalischen Kraftbegriff der klassischen Physik geworden. Die Suche nach der "physikalischen" Kraft führte zum Energiebegriff. Dabei ist zu bedenken, daß die Newtonsche Mechanik in ihrer klaren analytischen Form erst im 18. Jahrhundert niedergelegt wurde. Die explizite Formulierung des zweiten Newtonschen Axioms als $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, bzw. $m \cdot d\vec{v} = \vec{F} \cdot dt$ stammt aus Eulers 'Mechanik' von 1736. Man kann zwar in Newtons Satz "Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional" (Hervorhebung d.Verf.) die Zeit als Proportionalitätsfaktor hineinlesen; streng genommen lautet die Aussage $\Delta p \text{ prop. } F$. Dies leitet über zu einer genaueren Betrachtung des Kraftbegriffs in den 'Principia'.

Newtons Erklärung lautet:

Eine angebrachte Kraft ist das gegen einen Körper ausgeübte Bestreben, seinen Zustand zu ändern, entweder den der Ruhe oder den der gleichförmigen geradlinigen Bewegung.

Diese Kraft besteht nur in dem Bestreben und sie verbleibt, nachdem sie dieses ausgeübt hat, nicht im Körper. Dieser verharret nämlich in jedem neuen Zustande nur vermöge der Kraft der Trägheit. Die beigebrachte Kraft ist verschiedenen Ursprungs, wie z.B. durch Stoss, Druck, Centripetalkraft.

(Newton 1963, 22)

Als Zentripetalkräfte nennt Newton in dieser Einleitung die Schwere, die magnetische Kraft und "jene Kraft, welche es auch immer sei, durch welche die Planeten beständig von der gradlinigen Bewegung abgezogen ... werden" (S. 22).

Die Erklärung deutet auf eine relationale Prozeßgröße hin: Kraft besteht in einem "ausgeübten Bestreben". Gleichzeitig spricht Newton jedoch von der "Kraft der Trägheit". Diese sei dem Körper proportional und werde von ihm nur bei der Änderung seines Zustandes ausgeübt, der durch eine andere, an ihm angebrachte Kraft bewirkt werden solle. Das klingt als besitze der Körper die Kraft der Trägheit auch wenn er sie gerade nicht ausübt. In der lateinischen Originalfassung heißt das "Vermögen zu widerstehen" "*vis insita*", was man im Englischen als "*innate force of matter*", also "eingeschriebene Kraft" übersetzt. Was Newton mit der "Kraft der Trägheit" gemeint hat, ist nie ganz klar geworden. D'Alembert hat das Problem dahingehend gelöst, daß er Trägheitskräfte genauso behandelt wie äußere Kräfte. Ich würde vorschlagen, nicht von der "Kraft" der Trägheit zu sprechen, sondern lediglich von Trägheit oder träger Masse. Trägheit ist eine Eigenschaft von Körpern, die bei einer Wechselwirkung Reaktionskräfte bewirkt, die dann als normale äußere Kräfte am Wechselwirkungspartner

angreifen. Newton vermischt in der Kraft der Trägheit träge Masse und Reaktionskraft. Der Körper, so schreibt er, übe die Kraft der Trägheit bald als widerstehende, bald als angreifende Kraft aus.

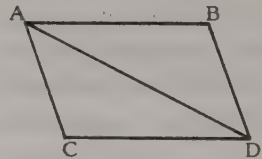
Widerstehend, in so fern der Körper, zur Erhaltung seines Zustandes, der angebrachten Kraft entgegenstrebt (träge Masse, d.Verf.); angreifend, in so fern er, indem er der Kraft des entgegenstehenden Hindernisses nur sehr schwer nachgiebt, den Zustand des letzteren zu ändern versucht (Reaktionskraft, d.Verf.).
(Newton 1963, 22)

Im dritten Buch unterscheidet Newton zwischen der "eigenthümlichen Kraft der Trägheit", die den Körpern wesentlich zukomme, und der Kraft der Schwere, die mit der Entfernung von der Erde abnehme (vgl. Newton 1963, 381). Die Stelle zeigt, daß Newton sowohl von Wechselwirkungskräften spricht, als auch von Kräften, die den Körpern selbst zuzuordnen sind. Wir werden darauf später zurückkommen.

An anderen Stellen der 'Principia' verwendet Newton "Kraft" in einer Bedeutung, die wir heute mit Impuls oder Kraftstoß kennzeichnen. (Wir zitieren die folgende Passage in einer englischen Fassung, weil uns die deutsche unvollständig erscheint.)

If a body in a given time, by the force M impressed apart in the place A, should with a uniform motion be carried from A to B, and by the force N impressed apart in the same place should be carried from A to C, let the parallelogram ABDC be completed, and, by both forces acting together, it will in the same time be carried in the diagonal from A to D.

(Newton nach Jammer 1957, 130;
vgl. Newton 1963, 33)



Entweder ist "force" hier als "eingeprägte Kraft" im Sinne der Impetustheorie zu verstehen, oder, was wahrscheinlicher ist, Newton meinte damit einen Kraftstoß $F \Delta t$, der am Ort A dem Körper einen Impuls verleiht. Das zweite Axiom kann dann so formuliert werden: "Die Änderung der Bewegung ist dem Kraftstoß proportional".

Rosenberger (1895, 176) nennt das zweite Axiom das "Gesetz von der unabhängigen Supposition der Kräfte". Das bezieht sich auf Newtons Zusatz:

"Wenn irgend eine Kraft eine gewisse Bewegung hervorbringt, so wird die doppelte eine doppelte, die dreifache eine dreifache erzeugen, mögen diese Kräfte zugleich und auf einmal, oder stufenweise auf ein-

ander folgen.
(Newton 1963, 32)

Diese Aussage macht dann Sinn, wenn man "Kraft" als Kraftstoß versteht, der dem Körper eine Zusatzgeschwindigkeit, bzw. einen Zusatzimpuls erteilt. Eine solche Interpretation macht auch eine Anmerkung Newtons zu den Bewegungsgesetzen verständlicher, in der er unverständlicherweise und entgegen den historischen Tatsachen behauptet, die Bewegungsgesetze seien bereits von anderen "Mathematikern" angenommen und durch vielfältige Versuche bestätigt worden. Besonders generös ist er gegenüber Galilei, dem er zuschreibt, mit Hilfe des ersten und des zweiten Axioms das Fallgesetz $s \propto t^2$ gefunden zu haben. Ohne klarzumachen, ob er eine Aussage Galileis meint oder ob er eine eigene Beschreibung der Fallbewegung vornimmt, schreibt er dann:

Wenn ein Körper fällt, so flösst ihm die gleichförmige Schwere, indem sie in den einzelnen gleichen Zeittheilchen gleich stark wirkt, gleiche Kräfte ein und erzeugt gleiche Geschwindigkeiten. In der ganzen Zeit flösst sie die ganze Kraft ein und erzeugt die ganze Geschwindigkeit.
(Newton 1963, 39; Hervorhebung d.Verf.)

Ersetzt man "eingeflößte Kraft" durch "Impetus" so hat man fast wörtlich die Falltheorie Buridans (vgl. S. 411). Ersetzt man dagegen "eingeflößte Kraft" durch "(Zusatz-) Impuls", so kann man die Wirkung der Schwere als kontinuierlichen Kraftstoß deuten.

Wir wollten an den obigen Textauszügen zeigen, daß der nominale Gebrauch des Wortes "Kraft" in den Principia Interpretationsspielraum bietet. Eindeutig ist lediglich die mathematische Verwendung als Kraftfunktion $F = F(m_1, m_2, r)$. Jammer (1957, 124) behauptet gar, Kraft sei bei Newton nirgends eigentlich festgelegt, sondern als a priori Begriff intuitiv vorausgesetzt.

Die analytische Mechanik des 18. Jahrhunderts brachte die Physik in der Frage nach dem angemessenen physikalischen Kraftbegriff nicht viel weiter. Ihr Beitrag besteht in der Fortentwicklung des Formalismus.

In the first half of the eighteenth century, the development of mechanics was in the hands of the mathematicians. The landmarks in this development are Euler's *Mechanica* in 1736, d'Alembert's *Traité de Dynamique* in 1743, and Lagrange's *Mécanique Analytique* in 1788. By that time the concepts in which mechanics was analysed, had been hammered out, except the concept of 'force' which was still in a state of flux, and the concept of 'energy' which had not yet been born. There were also two conservation principles: momentum (mv) was believed to be conserved under all conditions ..., and a fairly clear notion that the scalar quantity mv^2 was conserved at least in elastic collisions. Both were considered forces of some sort.
(Elkana 1974, 30; Hervorhebung d.Verf.)

Elkana bringt damit zum Ausdruck, daß die mathematische Behandlung der Größen $m \cdot a$, $m \cdot v$ und $m \cdot v^2$ klar war, ihre physikalische Bedeutung jedoch einer endgültigen Klärung noch bedurfte.

Auseinandersetzungen mit eventuell übriggebliebenen Peripatetikern fanden nicht statt. Der Weg zum Trägheitsdenken war durch Galilei, Descartes und Huygens geebnet worden. Newton nimmt in den Principia nirgends Stellung zum Aristotelischen Kraftbegriff. Überraschender ist, daß Newton sein Konzept nicht mit denen anderer zeitgenössischer Autoren verglichen hat. Selbst in der zweiten Auflage der 'Principia' von 1713 geht er nicht auf energetische Vorstellungen, wie die Leibnizens, ein. (Man kann allenfalls die Aussage, daß die Kraft nach der Einwirkung nicht im Körper verbleibe, als eine Abgrenzung auffassen.) Ich schließe daraus, daß Newton keinen direkten Gegensatz zu Leibnitz sah, den er hätte grundsätzlich austragen wollen, sondern daß er Gravitationskraft und "vis viva" als zwei unterschiedliche Zugänge zu den Naturkräften betrachtete.

Ab dem Ende des 17. Jahrhunderts spalteten sich in der Physik zwei Entwicklungslinien auf. Die eine Linie führt von Newton über Euler, d'Alembert, Lagrange und Hamilton, die den Formalismus der klassischen Mechanik auf abstrakt-mathematischer Ebene fortentwickelten, was die Möglichkeit eröffnete, konservative Systeme geschlossen zu behandeln. Das Programm der "rationalen Mechanik" zielte auf die Subsumption der Phänomene unter eine quantitative Theorie. Erfolgskriterien waren Geschlossenheit und formale Eleganz. Die Konstanz der Summe aus "lebendiger Kraft" (kinetischer Energie) und, wie Lagrange es nannte, "Potentialfunktion" (potentieller Energie) wurde als formales Prinzip gehandhabt. Universelle Erhaltungsideen spielten z.B. bei Lagrange keine Rolle (vgl. Elkana 1974, 36ff).

Die zweite Entwicklungslinie kann man mit den Namen Leibnitz, Johann Bernoulli, Faraday, Mayer, Helmholtz umreißen. Das antreibende Motiv dieser Richtung war die tiefe metaphysische Überzeugung von der Erhaltung der Naturkräfte ("Bewegungsfähigkeit", "Wirkungsfähigkeit"). Das Erhaltungdenken beruht auf drei Grundannahmen:

1. Der Entsprechung von Ursache und Wirkung: "Aus nichts wird nichts".
2. Der Vollkommenheit der Welt als göttlicher Schöpfung: Gott hat die Welt im Schöpfungsakt mit allem ausgestattet, was sie zum Fortbestehen braucht. Wenn die Fähigkeit zum gegenseitigen Einwirken der Körper aufeinander mit der Zeit abnähme, wäre die Schöpfung endlich, bzw. Gott müßte sie von Zeit zu Zeit erneuern.

Dazu kam gegen Ende des 18. Jahrhunderts die Annahme

3. der gegenseitigen Umwandelbarkeit der Naturkräfte: Licht, Magnetismus, Elektrizität, Bewegung, Gravitation sind verschiedene Erscheinungsformen einer allumfassenden Naturkraft.

Lange Zeit hatte das Erhaltungsdenken vorwiegend Bedeutung als heuristisches Prinzip. Quantisierung und Mathematisierung gelangen überzeugend erst im 19. Jahrhundert. Wenden wir uns als erstes dem von Leibnitz geprägten Begriff der "vis viva" (lebendige Kraft) zu.

Leibnitz hat die lebendige Kraft Descartes Bewegungsgröße $m \cdot v$ gegenübergestellt ("quantitas motus"; bei Descartes skalar). Nach Leibnitz bleibt nicht die Quantität der Bewegung, sondern die "Quantität der Kraft in der Reihe der Weltbegebenheiten" erhalten. Zum Beweis vergleicht er die Kräfte zweier in Bewegung befindlicher Körper anhand eines Effekts, bei dem die Kräfte vollständig verbraucht würden, d.h. vollständig in der Wirkung aufgehen. Das sei beim Anheben eines Gewichts der Fall. Er verweist auf Galilei, der bewiesen habe, daß ein Körper mit der Geschwindigkeit 2 auf die vierfache Höhe hinaufsteigen könne wie ein Körper gleicher Masse mit der Geschwindigkeit 1 (h prop. v^2). Andererseits sei die Wirkung gleich, wenn ein Körper A mit der Masse 4 auf die Höhe 1 gehoben werde, oder ein Körper B mit der Masse 1 auf die Höhe 4. Bei gleicher Wirkung müsse man auf gleiche Ursachen schließen, d.h. auf gleiche Kräfte. Diese Bedingung ließe sich nur erfüllen, wenn gelte $v_A = 1$, $v_B = 2$. Aus beiden Überlegungen folge für das wahre Maß der Kraft der Ausdruck $m \cdot v^2$.

Jeder Ursache kommt die gleiche Kraft zu wie ihrer vollen Wirkung, d.h. dem Effekt, den sie dadurch erzeugt, daß sie ihre Kraft verbraucht. (...) Setzen wir z.B., es wären zwei schwere Körper, so wird A ($m = 4$, $v = 1$; d.Verf.), wenn er seine Richtung nach oben wendet, sich vermöge seiner Geschwindigkeit ($= 1$) zur Höhe von einem Fuß erheben, während B ($m = 1$, $v = 2$; d.Verf.) mit der doppelten Geschwindigkeit bis zu 4 Fuß steigen wird, wie dies von Galilei und anderen bewiesen ist. In jeder dieser beiden Wirkungen wird die Kraft vollständig verbraucht, beide sind somit ihrer wirkenden Ursache gleich. Ferner sind die Wirkungen selbst, nämlich die Erhebung von 4 Pfund auf 1 Fuß Höhe und die von einem Pfund auf vier Fuß, ihrer Kraftleistung nach offenbar untereinander gleich, somit schließlich auch ihre Ursachen: Der Körper A mit der Masse 4 und der Geschwindigkeit 1 und B mit der Masse 1 und der Geschwindigkeit 2, was behauptet wurde. (Leibnitz nach Samburski 1978, 414)

Weiter als in dem zitierten Abschnitt hat Leibnitz die mathematische Formulierung der vis viva nicht getrieben. Der Streit um das wahre Maß der Bewegungsgröße zwischen Cartesianern und Leibnitzianern erstreckte sich (nachdem Huygens und Newton $m \cdot v$ vektoriell definiert hatten) bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts. Er trug bei aller Kontroversität wesentlich zur Etablierung des Erhaltungs-

denkens in der Physik bei.

Die vis viva hat einen viel anschaulicheren Charakter als die abstrakte mathematische Kraft Newtons oder auch Descartes Bewegungsgröße. Mit lebendiger Kraft ausgestattete Körper erlangen so etwas wie "Leben", das sie in die Lage versetzt, andere Körper zu beeinflussen. Vis viva ist mehr als Impetus. Der Impetus treibt die Eigenbewegung des Körpers voran. Vis viva verleiht ihm die Fähigkeit, etwas an anderen zu bewirken. Alle Veränderungen in der Natur wurden auf diese "Wirkfähigkeit" zurückgeführt.

Die zweite Entwicklungslinie unterscheidet sich von der rationalen Mechanik dadurch, daß sie der Suche nach den Grundprinzipien des Naturgeschehens, den Ursachen der Vorgänge in der Welt und dem Wesen der Kräfte größere Bedeutung zumißt als der mathematischen Formalisierung.

Durch die alleinige Betrachtung der wirkenden Ursachen oder der Materie (kann man) nicht von den Bewegungsgesetzen Rechenschaft geben, die man in unsren Tagen entdeckt hat, und die ich zum Teil selbst gefunden habe. Man muß vielmehr, wie ich erkannt habe, hier zu den Zweckursachen seine Zuflucht nehmen, da diese Gesetze nicht von dem Prinzip der Notwendigkeit, wie die logischen, arithmetischen und geometrischen Wahrheiten abhängen, sondern von dem Prinzip der Angemessenheit, d.h. von der durch die Weisheit getroffenen Wahl. Es ist dies einer der wirksamsten und augenfälligsten Beweise für die Existenz Gottes.

(Leibnitz nach Samburski 1978, 417)

Auf Leibnitz treffen nicht alle Kennzeichen der von uns so genannten "galileisch-newtonschen Physik" zu (vgl. S. 453). Er beschränkt sich nicht die Aufstellung funktionaler Zusammenhänge für den Ablauf der Naturvorgänge und beharrt auf dem Nachdenken über Zweckbestimmungen und letzte Ursachen. Aber auch das Denken von Leibnitz basiert auf idealen Gestalten, wie etwa im vorhin geschilderten Gedankenversuch zum wahren Maß der Bewegung. Leibnitz hält gegen die machbare Erfahrung am Prinzip der Erhaltung der "Bewegungsfähigkeit" fest. Er treibt den theoretischen Naturentwurf diesbezüglich weiter als Newton, der unter Berufung auf die Erfahrung einwendete, daß es keine vollkommen elastischen Körper gebe und daher bei jedem Stoß Bewegung verlorengehe (s.u.).

Leibnitz hat im Laufe seines Lebens die Vorstellung von der Erhaltung der Kraft verfeinert. Er schloß die lebendige Kraft mit einer latenten Kraft ("potentia agendi"; potentielle Energie) zu einer Gesamtkraft zusammen ("force vive absolue"), die erhalten bleibe (vgl. Hermann 1978, 90). Des weiteren unterschied Leibnitz zwischen einer lebendigen und einer toten Kraft ("vis mortua").

Hier ergibt sich also eine neue, zwiefache Unterscheidung der Kraft: die eine nämlich - ich bezeichne sie auch als tote Kraft - enthält erst das Element der Kraft, weil in ihr noch nicht die Bewegung selbst, sondern nur der Anreiz zur Bewegung gegeben ist, wie bei einem Stein in der Schleuder, der sich in der Richtung der Tangente zu entfernen sucht, auch wenn er durch das Band, an dem er befestigt ist, zurückgehalten wird. Die andere Kraft hingegen, ich nenne sie auch lebendige Kraft, ist die gewöhnliche, mit der zugleich eine tatsächliche Bewegung gegeben ist. Ein Beispiel für die tote Kraft ist die Zentrifugalkraft, weiterhin die Schwere oder Zentripetalkraft, ferner auch die Kraft, durch die ein gespannter elastischer Körper seinen ursprünglichen Zustand wiederherzustellen sucht. Beim Stoße aber - sei es, daß er von einem schweren Körper herrührt, der sich eine Zeitlang abwärts bewegt hat, oder auch von einem gespannten Bogen, der allmählich seine frühere Gestalt annimmt, oder von irgend einer ähnlichen Ursache - ist lebendige Kraft vorhanden, die aus unendlich vielen stetig fortgesetzten Einwirkungen der toten Kraft entstanden ist.
(Leibnitz nach Samburski 1978, 416)

Die vis mortua stellt eine Annäherung an das Newtonsche Kraftkonzept dar. Aber Leibnitz gibt die Kopplung der Kraft an einen Körper nicht auf. Er spricht von der toten Kraft als einer, durch die ein gespannter elastischer Körper seinen ursprünglichen Zustand wiederherzustellen suche oder der Kraft eines Steines in der Schleuder, der sich zu entfernen suche. Die tote Kraft der Schwere kann ebenfalls als Kraft des Steins interpretiert werden. Im newtonschen Sinne wäre von der Schwerkraft auf den Stein zu sprechen oder von der Kraft, die die Schleuder ausübt und durch die der Stein beschleunigt wird. Die tote Kraft liegt näher bei der potentiellen Energie als bei der Newtonschen Kraft. Sie ist jedoch keinem der beiden Konzepte gleichzusetzen. Die tote Kraft ist eine Mischform - eine Art innerer Antrieb zur Bewegung. Für die Newtonsche Kraft fehlt ihr das Element der äußeren Einwirkung. Außerdem geht Leibnitz nur auf statische oder quasistatische Beispiele ein. Für die potentielle Energie fehlt ihr der Charakter der Umwandelbarkeit. Bei der fortgesetzten Einwirkung der Schwere beim Fall entsteht lebendige Kraft, ohne daß die tote Kraft der Schwere abgebaut wird. Leibnitz hat den Gedanken der Entstehung von vis viva durch stetige Einwirkung der vis mortua nicht quantifiziert. Man erkennt andererseits, wie intensiv er an der Konzeptualisierung gearbeitet hat.

Leibnitz sah in Newton im Grunde einen Verbündeten. Beide Forscher postulierten die Existenz von Kräften, die das Naturgeschehen lenken. Sie standen damit gemeinsam gegen Descartes, der ein von Bewegung beherrschtes Universum annahm. Die Körper bestehen bei Descartes lediglich in ihrer Ausdehnung. Nach Leibnitz hat der Schöpfer der Materie eine Fähigkeit zur Aktion, eben Kraft eingepflanzt (Monadenlehre).

Fundamental gegensätzlich waren die Standpunkte von Newton und Leibnitz zur

Frage der Erhaltung der Kraft. In Newtons Kraftkonzept spielte die Erhaltung keine Rolle, da Kraft nur während der Dauer einer Wechselwirkung auftritt und nicht auf Körper übergeht. Dennoch beschäftigte er sich mit der Erhaltung des Bewegungskraft im leibnitzschen oder cartesischen Sinne. Das ist bemerkenswert, weil es zeigt, daß Newton der Annahme von Kräften in Körpern nicht grundsätzlich ablehnend gegenüberstand. Allerdings bezeichnete er die Erhaltungsidee als metaphysisch, weil durch Erfahrung nicht belegbar. Keinerlei Mitteilung von Bewegung geschehe jemals, ohne daß die dabei stattfindende Reibung einen Teil der Bewegung vernichte.

Darnach glaubte er, entgegengesetzt wie Leibnitz oder Descartes, den allgemeinen Satz aufstellen zu können, dass die gesammte Kraft der in der Welt vorhandenen Bewegungen zu keiner Zeit dieselbe bleiben könne, sondern dass vielmehr mit jeder in der Welt stattfindenden Bewegung die Grösse der Bewegungssumme sich stetig vermindern müsse. Damit aber hielt er weiter für ausgemacht, dass das Universum nie durch Bewegung allein, sondern nur durch thätige Principien oder Kräfte zu existiren vermöge, welche die immer verlorengehenden Bewegungen zum Theil wenigstens wieder ersetzen.
(Rosenberger 1895, 412)

Über diese Fragen ergab sich ein Briefwechsel zwischen Leibnitz und Clarke, der an Newtons Stelle korrespondierte. Der Streit wurde stark mit theologischen Argumenten geführt. Leibnitz warf Newton vor, er hege die heitere Meinung, daß Gott die Welt wie eine Uhr von Zeit zu Zeit aufziehen oder gar reparieren müsse, wenn sie nicht ganz stehen bleiben solle. Er (Leibnitz) aber meine, daß dieselbe Kraft und Stärke in der Welt immer erhalten bleibe und nur gemäß den Naturgesetzen zwischen den Materien sich umwechsle (vgl. Rosenberger 1895, 514). Außerdem trat Leibnitz der Gravitationsfernwirkung entgegen.

Clarke stellte die Anziehung der Himmelskörper als Erfahrungstatsache hin. Die Fernwirkung wurde von ihm relativiert. Ein Körper könne nicht dort wirken, wo er nicht sei. Aber das Medium, das die Anziehung vermittele, sei vielleicht unsichtbar und nicht mechanischer Natur. Die Existenz eines immateriellen Agens hat Newton selbst in Erwägung geogen (vgl. Rosenberger 1895, 412f). Die Zuführung von Kraft, so Clarke, müsse nicht, wie Leibnitz behauptet habe, durch Wunder geschehen. Bei jeder wirklichen Einwirkung auf einen Körper (z.B. beim Stoß) werde einem Körper neue Kraft zugeführt. Newton hat im Anhang der 'Optik' geschrieben, um das Weltgeschehen aufrechtzuerhalten, müßten tätige Prinzipien, wie die Schwere oder die magnetische Anziehung den Körpern neue Bewegungen verleihen. Diese Prinzipien seien keine okkulten Eigenschaften, sondern beschrieben den Willen Gottes (vgl. Rosenberger 1895, 324ff). Man erkennt die unterschiedlichen Rollen der Kraft bei Newton, wo sie als aktive

Einwirkung ("tätiges Prinzip") Bewegungen verändert, bzw. neue Bewegung erzeugt (Kraftstoß) und bei Leibnitz, wo sie als Erhaltungsgröße zwischen den Körpern ausgetauscht wird.

Leibnitz erwiderte Clarke, er habe nur solche Mitteilungen von Kräften als übernatürlich bezeichnet, bei denen kein entsprechender Verlust festzustellen sei, bei denen also das Universum als Ganzes seine Kraft vermehre (vgl. Rosenberger 1895, 517).

Man wirft mir vor, dass unelastische Körper beim Zusammenstoß von ihrer Kraft verlieren. Ich muss dem widersprechen. Es ist wahr, dass die Körper in Bezug auf ihre Massenbewegung verlieren, aber der Verlust wird nur auf die inneren Theile derselben übertragen, ist also nur scheinbar. Die Kräfte werden nicht zerstört, sondern unter die Moleküle der Körper verteilt.

(Leibnitz nach Rosenberger 1895, 411)

Die Erhaltung der Kraft ist bei Leibnitz und später bei Faraday, Mayer und Helmholtz kein aus Erfahrung abgeleitetes Prinzip, sondern ein spekulativer Naturentwurf, der als heuristisches Prinzip Anstöße für die Produktion von Erfahrung gibt. Den Gedanken, daß beim unelastischen Stoß Kraft auf die Moleküle der Körper übergeht hat Newton nie verfolgt. Er erscheint nur sinnvoll im Rahmen eines konsequenten Erhaltungsdenkens. Einen Zusammenhang zwischen Verlust an vis viva und Erwärmung stellte Leibnitz übrigens nicht her.

Der Briefwechsel zwischen dem Newtonianer Clarke und Leibnitz zeigt, wie vieldeutig der Kraftbegriff zu dieser Zeit (um 1715) verwendet wurde. Es bestand offensichtlich keine Tendenz zur systematischen Unterscheidung von vis viva und Newtonscher Kraft, etwa auf der Grundlage ihrer Dimensionen. "Kraft" war ein universelles Erklärungsschema. Die einzelnen Konzepte standen nicht gegeneinander sondern nebeneinander. An keiner mir bekannten Stelle argumentiert Newton gegen das Kraftkonzept von Leibnitz damit, die vis viva erfülle seine drei Axiome nicht. Immerhin war auch die Gravitationskraft physikalisch keineswegs geklärt. Sollte man sie den Körpern als inhärente Potenz zuschreiben? Und wodurch wurde sie vermittelt?

Der vis viva, bzw. der force vive absolue mangelte es an mathematischer Präzisierung und an damit zusammenhängenden empirisch nachprüfbareren Vorhersagen. Solange keine Verallgemeinerung der Krafterhaltung auf nichtmechanische Vorgänge gelang, mußte die lebendige Kraft eine relativ vage Idee bleiben. (Was ihre Fruchtbarkeit als heuristisches Prinzip eher steigerte.) Die fehlende Begriffsschärfe behinderte das Erkennen der grundsätzlichen Verschiedenheit vom Newtonschen Kraftbegriff.

Unter dem Einfluß der enormen Fortschritte auf der ersten Entwicklungslinie beim Formalismus der klassischen Mechanik ging das Interesse am konzeptuellen Ausbau der Krafterhaltung um 1740 zurück. Die Erhaltung der Kraft wurde als mathematisches Prinzip in die Theorie integriert (Lagrangefunktion). Gleichzeitig wurde die Suche nach einer "physikalischen" Erklärung der Gravitation (was nach damaligem Verständnis eine mechanistische hätte sein müssen) als müßig eingestellt. Die "mathematische" Kraft Newtons setzte sich in der Physik durch.

Gegen die einfache mathematische Abstraction einer Kraft, die nichts weiter als das Gesetz der Wirkung repräsentirte, vermochten die mathematisch so schwer zu fassenden Wirbel ... nicht zu concurriren.
(Rosenberger 1895, 526)

Nach dem Muster der Gravitationstheorie formulierte Coulomb das magnetostatische und das elektrostatische Kraftgesetz.

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts gab es neue Anstöße zur Wiederaufnahme der zweiten Entwicklungslinie:

1. Der Begriff der Arbeit wurde bei der Entwicklung technischer Maschinen bedeutsam und fand zunehmend Eingang in theoretische Untersuchungen. Er wurde zum Komplementärbegriff der lebendigen Kraft.
2. Die kinetische Wärmetheorie eröffnete neue Möglichkeiten zur Vereinigung von Mechanik und Wäremelehre unter dem Gesichtspunkt der Erhaltung der Kraft.
3. In der romantischen Naturphilosophie erlangte der Begriff Kraft eine zentrale Stellung. Die "Dynamisten" (z.B. Schelling, Oerstedt und Faraday) waren davon überzeugt, daß Gravitation, elektrische und magnetische Wechselwirkung, Kohäsion usw. verschiedene Erscheinungsformen einer Urkraft seien.

(vgl. Hermann 1978, 75 u. 90f)

Die Arbeiten von Mayer, Joule, Rankine, Helmholtz und anderen führten schließlich über das mechanische Wärmeäquivalent zu einer präzisen Formulierung des universellen Energieerhaltungssatzes. Erst jetzt entwickelte sich ein klares Bewußtsein von der Notwendigkeit einer klaren, auch terminologischen Differenzierung zwischen der "mathematischen" Kraft Newtons und der "physikalischen" Kraft heraus. Die Umbenennung der "physikalischen" Kraft in "Energie" ist eher unglücklich (man hätte ja auch der "mathematischen" Kraft einen anderen Namen geben können), gerade wenn man sieht, daß in der modernen Physik die Energie wegen ihres Erhaltungscharakters der Kraft den Rang abgelaufen hat und es Versuche gibt, die Kraft aus der Theorie der Mechanik zu eliminieren (z.B. von Hertz und Mach). Darauf, daß man der "physikalischen Kraft" (Energie) eigentlich den Vorrang vor der "mathematischen" einräumte, führe ich das Festhalten an

der Sprechweise von der "Erhaltung der Kraft" bis zum Ende des 19. Jahrhunderts zurück. Aus unserer heutigen Sicht erscheint das nur deshalb inkonsequent, weil in unserem Alltag das Wort "Energie" "Kraft" hinsichtlich Verbreitung und öffentlichem Bewußtsein ebenbürtig ist. Im 19. Jahrhundert war "Energie" lediglich ein *Terminus technicus* ohne Tradition.

Mayer hat den Nachfolgern Newtons vorgeworfen, die "physikalische" und die "mathematische" Kraft gleichgesetzt zu haben. Mayer unterschied zwischen Newtons Gravitationskraft, die rein analytisch als Differentialquotient ($\vec{F} = d\vec{p}/dt$) zur Bestimmung der Bahnkurve diene und der physikalischen Ursache des Falls, die dem Produkt aus Masse und Geschwindigkeitsquadrat proportional sei. "Mathematische" und "physikalische" Kraft seien so unterschiedliche Konzepte, daß man sie nicht in einem Gattungsbegriff vereinigen könne. Mayer reservierte, wie Helmholtz und viele andere, für das letztere Konzept (heute Energie) das Begriffswort "Kraft", weil er es für das physikalisch fundamentalere hielt (vgl. Kuznecov 1970, 186f).

Elkana hat Helmholtz' Aufsatz "Über die Erhaltung der Kraft" von 1847 einer eingehenden Textkritik unterworfen, um zu sehen, ob man die verwendeten Ausdrücke "Arbeitskraft", "Bewegungskraft", "bewegende Kraft", "lebendige Kraft" und "wirkende Kraft" eindeutig durch Kraft oder Energie in ihren heutigen Bedeutungen ersetzen kann. Er kommt zu dem Ergebnis, das sei nicht immer möglich.

To sum up the argument - these passages, taken all together, are intelligible only, if we leave 'Kraft' unchanged. The Helmholtzian 'Kraft' is a vague entity, just that something must be conserved in Nature: 'Kraft' is a concept in flux, a concept that will become fixed as our 'energy' only after Helmholtz has completed his mathematical reduction of all the 'Kräfte' to the form of mechanical energy.
(Elkana 1974, 133)

Elkana schreibt der mathematischen Formulierung des Energiesatzes entscheidende Bedeutung für die endgültige Klärung der Begriffe Kraft und Energie zu. Wir sehen darin ein Beispiel für den Übergang von einer Anschauungsgröße zu einer Ersatzgröße. Erst wenn die Anschauungsgrößen oder heuristischen Begriffe (wie Körperkraft, menschliche Arbeit oder Naturkraft) ihrer sinnlichen, konkreten Wesenszüge beraubt sind und mathematisch eindeutig handhabbare Ersatzgrößen eingeführt werden (Newtonsche Kraft, physikalische Arbeit und Energie), ist der physikalische Begriffsbildungsprozeß abgeschlossen (vgl. Schaefer 1980).

Wir wollen auf die Schritte zur Formulierung des Energieerhaltungssatzes nicht näher eingehen. Statt dessen greifen wir die Vorform der Energieerhaltung im Dynamismus auf, weil wir daran zeigen können, wie umfassend Kraft als

Beschreibungsbegriff für das Naturgeschehen verwendet wurde und welche Abstrahierung davon in den quantisierten Aus- bzw. Umtauschrelationen der Energieäquivalente und den Arbeitsintegralen zum Ausdruck kommt. Sowohl der Newtonsche Kraftbegriff als auch das Energieerhaltungsprinzip in seiner modernen Form bilden nur Ausschnitte aus dem viel umfassenderen Gedankenbild der "Naturkräfte" ab.

Im Dynamismus wurde das Gedankengut Leibnizens wiederaufgegriffen, nachdem lange Zeit die mathematische Mechanik in der Tradition Newtons vorgeherrscht hatte. Der Dynamismus ist als Gegenbewegung zur Konzentration auf die Aufstellung von Kraftfunktionen zu sehen. Kräfte wurden wieder als antreibende Wesenheiten des Weltgeschehens angesehen. Faradays Arbeiten zur Umwandlung von Magnetismus in Elektrizität, die nach langen vergeblichen Versuchen zum Ziel führten, wurden durch seine feste Überzeugung von der Umwandelbarkeit der Naturkräfte aufrechterhalten. Faradays Kraftbegriff entsprach weder dem Newtonschen noch der Energie in ihrem eingeschränkten modernen Sinne, wenngleich er letzterer näher steht.

Faraday bezieht sich auf die konkreten Naturqualitäten Licht, Schwere usw., der Begriff der mechanischen Arbeit und der potentiellen Energie ist für ihn bedeutungslos. (...) Unter Kraft versteht Faraday ... Wärme, Elektrizität, Magnetismus, chemische Anziehung und Gravitation. (Breger 1982, 111)

Gerade die Unschärfe und mathematische Unbelastetheit seines Kraftbegriffs leitete Faraday bei der Entdeckung der Induktion und der Elektrolyse ("chemische Kraft des elektrischen Stroms") an. In seinen späten Jahren befaßte er sich aus gleichem Antrieb mit dem Zusammenhang von elektrischer Kraft und Gravitation. Seinen Kraftbegriff beschrieb er folgendermaßen:

What I mean by the word 'force' is the cause of a physical action; the source or sources of all possible changes amongst the particles or materials of the universe. (Faraday nach Breger 1982, 112)

Quantisiert hat Faraday seinen Kraftbegriff nur für spezielle Fälle (z.B. in den Faradayschen Gesetzen zur Elektrolyse). Eine allgemein gültige Gleichung gibt es nicht. Faradays Kraftbegriff ist ein qualitatives Denkprinzip, das seiner Abneigung gegenüber Mathematisierungen entsprach. Hermann (1970, 252) unterstellt Faraday, er habe die exakte, mathematische Fassung physikalischer Begriffe, wie des Newtonschen Kraftbegriffs, nie wirklich verstanden. In diesem Zusammenhang ist ein Zitat aus einer Veröffentlichung von 1857, also lange nach Formulierung des Energieerhaltungssatzes, aufschlußreich - aufschlußreich für Faradays Verständnis des Newtonschen Begriffs, aufschlußreich aber auch bezüg-

lich seines eigenen Kraftbegriffes. Faraday nimmt darin Stellung zum Gravitationsgesetz ($F \propto 1/r^2$):

Die Kraft bei der Entfernung 10 mag gleich eins gesetzt werden. Dann wird bei einer zehnfach geringeren Entfernung 1 die Kraft gleich 100 geworden sein ... Aber woher ist diese enorme Vermehrung der Kraft gekommen? Sagen wir, daß dies der Charakter dieser Kraft (der Gravitationskraft, d.Verf.) ist und begnügen wir damit als einer ausreichenden Antwort, so geben wir eine Schöpfung von Kraft zu, und dies in enormen Beträge ... Wir würden das höchste Gesetz der physischen Wissenschaften aufgeben ... nämlich die Erhaltung der Kraft.
(Faraday nach Hermann 1970, 252 und Breger 1982, 111f)

Aufzuklären wäre der Widerspruch, den Faraday empfindet, wenn man streng zwischen Kraft im Newtonschen Sinn und potentieller Energie trennt. Faraday tut das bewußt nicht. Energie entwickelte sich zu einem ebenso formalisierten, mathematisierten Konzept wie die Newtonsche Kraft. In Ausdrücken wie $1/2 m \cdot v^2$ (kinetische Energie), $1/2 D \cdot x^2$ (Spannenergie einer Feder) oder $1/2 C \cdot U^2$ (elektrische Energie eines Kondensators) spiegelt sich der heuristische Begriff "Kraft" als elementare Ursache des Naturgeschehens kaum noch wieder. Weder Newtonsche Kraft noch Energie konnten die umfassende Bedeutung der Faradayschen Kraft abdecken. Man sollte in Faradays Einwand gegen das Gravitationsgesetz nicht nur ein Fehlverständnis sehen, denn sein Festhalten an der Erhaltung der "Kraft" führte ihn gleichzeitig zur Grundlegung des Feldkonzepts.

Faraday hat über das "Wesen der Schwerkraft" (1855) folgendermaßen nachgedacht (vgl. Faraday nach Samburski 1978, 546ff): Man bringe die Erde aus einem weit entfernten Teil des Universums in die Nähe der Sonne. Es komme dann zur gegenseitigen Anziehung durch die Schwerkraft. Wenn aber die Sonne die Erde anziehe, so müsse diese Anziehungskraft entweder wegen des Vorhandenseins der Erde in der Nähe der Sonne entstehen oder sie müsse in der Sonne schon vorher vorhanden gewesen sein. Im ersten Fall werde angenommen, daß beide Körper ursprünglich ohne Kraft gewesen seien.

Wie kann diese Kraft durch ihre bloße Annäherung oder Koexistenz entstehen? Daß ein kraftloser Körper in einem anderen entfernten Körper Kraft erzeugen könne, läßt sich kaum vorstellen; noch schwieriger ist es aber, wenn dies überhaupt möglich ist, eine solche Vorstellung gelten zu lassen, wenn man bedenkt, daß sie die Schöpfung von Kraft involviert ... (Kraft) kann aber nicht geschaffen oder vernichtet oder gänzlich aufgehoben werden, ohne daß eine äquivalente Wirkung stattfindet.
(Faraday nach Samburski 1978, 547f)

Faraday kann einen solchen Verstoß gegen die Erhaltung der Kraft nicht akzeptieren. Es bleibe nur die Annahme, "daß die Kraft oder deren wirkende Quelle schon vorher in der Sonne (oder der Erde) existierte, bevor die Erde (oder die

Sonne) anwesend war". Bei Geltung der Krafterhaltung gebe es dann drei Möglichkeiten:

1. Die Gravitationsanziehung von der Sonne auf die Erde werde anderen Planeten entzogen.
2. Die Anziehungskraft entstamme aus der Umwandlung einer anderen Kraft.
3. Die Schwerkraft sei beständig um die Sonne herum und durch den ganzen unendlichen Raum vorhanden.

Die erste Möglichkeit verwirft Faraday, weil sie von den Astronomen bei den verschiedenen Stellungen der Planeten nicht beobachtet worden sei. Bezüglich der zweiten Möglichkeit verweist er auf seine eigenen vergeblichen Versuche, die Schwerkraft mit der Elektrizität zu verbinden. Es bleibe also nur die dritte Möglichkeit.

Diese Möglichkeit eines beständig und für eine Wirkung im Raum notwendigen Zustands, auch wenn die Erde relativ zur Sonne nicht da ist, und einer gewissen Gravitationswirkung als Resultat dieses früheren Zustands, wenn die Erde da ist, stimmt meines Erachtens mit der Erhaltung der Kraft überein. Ich glaube auch, daß es dieser Fall war, den Newton in seinen Betrachtungen über die Schwerkraft behandelte, daß es sich um dieselben Umstände handelt, die in bezug auf Licht, Wärme und Strahlungserscheinungen in theoretischer Hinsicht schon allgemein anerkannt sind.

(Faraday nach Samburski 1978, 549f)

Faraday hat damit den konzeptuellen Grundstein für das Gravitationsfeld gelegt. Die Krafterhaltung ist erneut als heuristisches Prinzip fruchtbar geworden. Weiterhin wird die Unzufriedenheit mit dem mathematischen Kraftbegriff Newtons deutlich. Für Faraday kann die Kraft nicht lediglich als Kraftfunktion während der Wechselwirkung da sein. Sie muß physikalisch im Raum verteilt vorhanden sein. Das Feldkonzept war im 19. Jahrhundert mit seinen Kraftlinien, Äthervorstellungen und Spannungszuständen des Raums anschaulicher physikalischer Modellbildung dienlich. Maxwell entwickelte seine Theorie des elektromagnetischen Feldes anhand von hydrodynamischen Vorstellungen über Wirbelströmungen in einem immateriellen Äther. Erst in der Endfassung der Theorie ("Treatise on electricity and magnetism", 1873) werden alle mechanischen Analogien aufgegeben und eine Fassung erreicht, in der die Gleichungen eine Eigendynamik entwickeln konnten.

D.4.3

Zusammenfassung und didaktische Wertung

Wir konnten zeigen, daß der Newtonsche Kraftbegriff, wie er in den 'Principia' formal festgelegt wird, in der Forschergemeinschaft die Diskussion um das physikalische Kraftkonzept nicht beendete. Die Newtonsche Theorie fand als mathematischer Formalismus volle Anerkennung. Physikalisch wurden jedoch Zweifel an ihrem Sinn erhoben. Insbesondere die Überzeugung von der Erhaltung der Naturkräfte, die von vielen Naturwissenschaftlern a priori vorausgesetzt wurde, bildete das antreibende Moment für eine Forschungslinie, die über Leibnitz und den Dynamismus zum universellen Energieprinzip führte. Diese Schiene verlief parallel zum Programm der auf analytische Formalisierung ausgerichteten rationalen Mechanik in der Tradition Newtons (Euler, D'Alembert, Lagrange). Aus heutiger Sicht wird der Kraftbegriff Newtons als der physikalische hingestellt. Dies ist aber nur gerechtfertigt vom Standpunkt des formal voll ausgebildeten Kraft- und Energiebegriffs seit der Mitte des 19. Jahrhunderts. Erst die auch mathematisch klare Abgrenzung des Energiebegriffs vom Newtonschen Kraftbegriff führte zu dem physikalischen Kraftverständnis, das wir heute der klassischen Mechanik zuordnen. Beide Konzepte, Kraft und Energie, bilden Ausschnitte aus dem umfassenden Gedankenbild der Naturkraft, bzw. Naturkräfte ab. Vor 1850 bestand kein einheitliches physikalisches Kraftverständnis.

Elkana (1974), der die Entstehungsgeschichte des Energiebegriffs nachverfolgt hat, hält einen solchermaßen ungeklärten Zustand des Begriffes "Kraft" für eine notwendige Voraussetzung dafür, daß die Forschergemeinschaft produktiv an der Weiterentwicklung des Begriffsgebäudes der Physik arbeiten konnte, was schließlich zur Differenzierung von Kraft und Energie führte. In der Einleitung zu seiner Arbeit schreibt Elkana:

The confusion between 'force' and 'energy' (as we use these terms) in the works of Helmholtz and some of his contemporaries, was not only a verbal one, ... but rather a necessary prerequisite for the final clarification of the concepts. Only an undefined entity could have been the subject of a general belief in principles of conservation in nature.
(Elkana 1974, 9)

Die didaktische Relevanz der Ergebnisse der historischen Aufarbeitung liegt in den Parallelen zwischen der Aufnahme und Wertung des Newtonschen Kraftbegriffs in der zeitgenössischen Forschergemeinschaft und Schülerreaktionen auf den Newtonschen Kraftbegriff in der Sekundarstufe II. Auch Schüler halten an einem viel weiter gefaßten Kraftbegriff fest, als er in der heutigen Darstellungsweise der klassischen Mechanik enthalten ist. Die Schüler sprechen von der Kraft einer rollenden Kugel, von Kraftübertragung beim Stoß, vom Freiwerden

von Kräften, vom Gewicht als Eigenschaft eines Körpers oder davon, daß eine körperliche Anstrengung Kraft koste. Durch die Newtonschen Axiome wird für die Schüler das, was man physikalisch unter Kraft versteht, keineswegs eindeutig festgelegt. Das Begriffskluster Kraft/Energie/Schwung/Wucht/... besteht fort. Das können wir in unseren Fallstudien an vielen Beispielen nachweisen (vgl. Kapitel E, besonders Fallstudie 2).

Die geschichtlichen Ergebnisse lassen sich didaktisch folgendermaßen werten:

1. Es ist gar nicht zu erwarten, daß die Schüler mit der Behandlung des Newtonschen Kraftbegriffs die Frage nach den "Naturkräften" für grundsätzlich geklärt halten. Implizit arbeiten die Schüler mit einem viel umfassenderen Verständnis von "Kraft", das durch eine "Rechenvorschrift" $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, auf die die Newtonsche Theorie oft verkürzt wird, überhaupt nicht geordnet werden kann.
2. Die eingeschränkte Bedeutung, die Kraft heute in der physikalischen Theorie hat, kann erst dann klar erkannt werden, wenn der Energiebegriff ebenso eindeutig festgelegt worden ist. Die Begriffe Kraft und Energie werden nicht getrennt und nacheinander gebildet. Sie prägen sich gemeinsam und in gegenseitiger Abgrenzung aus.
3. Die Verwendungsbreite und die Unschärfe des Schülerverständnisses von "Kraft" ist als produktiv nutzbare Zwischenphase auf dem Wege zu einer erst im Zusammenhang mit dem Energiebegriff erreichbaren Begriffsklarheit zu verstehen.
4. Die durcheinandergehende Verwendung der Begriffswörter Kraft und Energie ist nicht einfach auf Verwechslungen zurückzuführen. In der Zwischenphase besteht vielmehr noch kein Bewußtsein von der prinzipiellen Unterschiedlichkeit der physikalischen Konzepte, die damit bezeichnet werden. Die Kraft-/Energievorstellungen der Schüler werden teilweise mit keinem der anerkannten physikalischen Konzepte übereinstimmen. Eine aus Lehrersicht vorgenommene Einteilung der Schüleräußerungen in Kraft, Energie, Impuls wird der Universalität der Schülerkonzepte nicht immer gerecht.
5. Der Prozeß der Bildung der physikalischen Begriffe Kraft und Energie ist dann abgeschlossen, wenn beide Begriffe als formalisierte Ersatzgrößen erkannt worden sind, die zu den Anschauungsgrößen nur noch eine mittelbare Beziehung haben.

Kapitel E

FALLSTUDIEN ZUM SCHÜLERVERHALTEN IM MECHANIKUNTERRICHT
DER SEKUNDARSTUFE II

E.1

Einleitung

Entsprechend dem empirischen Forschungsprogramm, das unter Punkt A.3.3 vorgestellt wurde (siehe besonders Abbildung A8 auf Seite 91) besteht der abschließende Schritt, bei dem sich die Erklärungsmächtigkeit des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik erweist, in der Rekonstruktion von Schülerverhalten in konkreten Unterrichtssituationen. Unter Rekonstruktion verstehen wir die Rückführung dokumentierter Aussagen und Handlungen auf das Fungieren bestimmter Vorverständniselemente in einer Unterrichtssituation, die in ihren äußeren Begebenheiten bekannt ist. Wir werden in Kapitel E drei solche Rekonstruktionen vorstellen. Alle drei Unterrichtsbeispiele betreffen Aspekte des Kraftbegriffs, dessen Aneignung Schülern besondere Probleme bereitet. Im ersten Beispiel geht es um die Einführung des Trägheitsprinzips, im zweiten arbeiten Schüler in einer SVU-Phase am Thema Stoßvorgänge, Gegenstand der dritten Fallstudie ist das Wechselwirkungsprinzip. Es handelt sich jeweils um Leistungskursschüler.

Wir haben bereits im Kapitel B bei der Entwicklung und Diskussion der Elemente des thematischen Vorverständnisses kürzere Fallstudien durchgeführt. Es handelte sich um "Fallstudien erster Art", die jeweils im Hinblick auf die isolierte Veranschaulichung einzelner Denkraumen, Präkonzepte usw. ausgewählt worden waren. In den Fallstudien im Kapitel E wird dagegen das Schülerverhalten durchgehend über mindestens zwei Schulstunden interpretiert, um das Zusammenwirken verschiedener Vorverständniselemente in komplexen Unterrichtssituationen zu zeigen.

Die verwendeten Wortprotokolle sind weitgehend ungekürzt. Für die Fallstudien 1 und 3 wurden Stunden ausgewählt, in denen die Schüler das Informationsangebot offen erkennbar nicht in der vom Lehrer intendierten Weise aufnehmen und verarbeiten. Solche Unterrichtsprotokolle sind für Rekonstruktionen besonders interessant, weil Denkweisen zutage treten, die sonst verdeckt fungieren. Fallstudie 2 zeigt Schüler bei der Abarbeitung ihrer individuellen Kraftkonzepte am Phänomen des Stoßes. Diese Fallstudie dient gleichzeitig zur Vorstellung der Gestaltung eines am Schülervorverständnis orientierten Physikunterrichts (SVU).

Der Schwerpunkt bei den Interpretationen liegt auf physikalisch falschen Schüleraussagen, ebenso wie wir bei der Darstellung des thematischen Vorverständnisses unser besonderes Augenmerk den alternativen Konzepten und Denkraumen gewidmet haben (siehe dazu Seite 126). Wir verzichten weitgehend auf eine kritische Wertung der Lehreraussagen und -fragen.

E.2 Fallstudie 1: Einführung des Trägheitsprinzips

Die erste Fallstudie beruht auf einem Wortprotokoll aus einem Leistungskurs Mechanik. Es handelt sich um eine Doppelstunde am Beginn des Themengebiets Dynamik. Im Kurs war der Zusammenhang von Kraft und Bewegung noch nicht explizit behandelt worden, auch wenn im Rahmen der Kinematik verschiedentlich die Stichworte Kraft oder Energie gefallen waren. Die Schüleraussagen beruhen also auf individuellen Vorverständnissen, die bezüglich Kraft/Energie eher durch außerschulische Erfahrungen und die Alltagssprachliche Verständigung geprägt sind als durch Physikunterricht.

Lehrer Wir haben die ganze Zeit vorher immer über Bewegungen geredet. Wie kommt es eigentlich zu Bewegungen?

Detlev ... also, z.B. daß die Erdanziehungskraft einen Körper ...

Lehrer Erdanziehungskraft - was für Bewegungen kommen da her? Andreas?

Andreas Fallbewegungen.

Lehrer Ja. Und wenn man mit dem Auto fährt, was dann? - - Was bewegt sich denn noch so alles?

Jörg Der Motor!

Lorenz Das Auto steht und der Motor fährt weg, oder wie?

Schüler (lachen)

Lehrer Lorenz!

Lorenz Durch irgendeine Kraft. Daß da eine Kraft wirkt auf irgendeinen Gegenstand, und dann bewegt der sich. Wenn ich jetzt z.B. so einen kleinen Wagen (Fahrbahn-Experimentierwagen) anschubse, dann rollt der ein Stück - dann rollt der ein ganz bestimmtes Stück.

Der Lehrer beginnt mit einer weitgefaßten Frage. Detlev nennt als erstes eine spezielle Kraft, die Erdanziehungskraft, als Ursache von Bewegung. Jörg bringt den Motor ins Spiel - der Lehrer hatte zuvor das Stichwort "Auto" genannt. Jörgs Ausruf "Der Motor!" bezieht sich auf den ersten Teil der Lehrerfrage, auch wenn Lorenz sie so interpretiert (um einen Scherz zu machen), als meinte Jörg eine Eigenbewegung des Motors. In seiner auf den Ordnungsruf des Lehrers nachgeschobenen Aussage nennt Lorenz als Ursache für Bewegung ein allgemeines Prinzip: Körper bewegen sich, wenn Kräfte auf sie einwirken oder eingewirkt haben. Eine bestimmte Kraft (Kraftstoß) bewirkt ein bestimmtes Maß an Bewegung, das sich in einer bestimmten Strecke ausdrückt, die der Körper zurücklegt. Das von Lorenz genannte Prinzip beruht auf der Erfahrung 1, daß alle Bewegungen gegen Widerstände erfolgen und daher zur Ruhe kommen, wenn nicht ständig ein Beweger vorhanden ist, und dem Präkonzept 3-2 "In Richtung der Bewegung wirkt eine Kraft". Man sollte die der Äußerung zugrundeliegende

Abstraktionsleistung nicht unterbewerten. Auf die Frage, wie es zu Bewegungen kommt, kann man auch sehr konkrete Ursachen nennen (wie Jörg es getan hat): Motoren, Menschen, Zugtiere, Wind, Abhänge usw. Das Vorverständniselement AI3 mit der Tendenz zu praktisch-technischen Überlegungen fungiert in der vorliegenden Fallstudie nicht. Ein Grund dafür mag sein, daß den Schülern klar ist, worauf der Lehrer hinauswill, nämlich auf die grundsätzliche Klärung des Verhältnisses von Kraft und Bewegung.

Lehrer Wovon hängt denn die Art der Bewegung ab? Es wurde gesagt, da muß irgendeine Kraft wirken, z.B. die Erdanziehungskraft. Aber gibt es da irgendwelche Gesetzmäßigkeiten oder irgendwelche konkreteren Zusammenhänge zwischen einer Bewegung und dem, was diese Bewegung verursacht? - -

Schüler (längeres Schweigen)

Lorenz Beim waagerechten Wurf, da ist erstmal die Erdanziehung und einmal die Kraft, die ausgeübt wird auf die Kugel in waagerechter Richtung. Das zusammen ergibt dann diese Wurfbewegung.

Rainer Ich glaube da wirkt nur die Erdanziehungskraft. ... Bewegung ist eine Kraft.

Lehrer Bewegung ist eine Kraft. Ja, das hat Rainer eben gesagt. Thorsten?

Thorsten Ich würde sagen, Bewegung wird durch Einwirkung von Kraft bewirkt.

Rainer Ja, aber die Bewegung selber ist auch eine Kraft. Wenn man jetzt z.B. mit dem Auto gegen eine Mauer fährt, dann wird ja auch eine Kraft auf die Mauer ausgeübt. Dann muß das Auto auch - (bricht ab)

Lehrer Hm. Markus?

Markus Dann wird die Bewegung umgesetzt. Bewegung ist keine Kraft. Nur wenn dann das Auto mit seiner Bewegung gegen die Mauer fährt, dann wird Bewegung in Kraft umgesetzt.

Lehrer Hm. Wollen mal versuchen zusammenzufassen, was ihr so gesagt habt. (geht zur Tafel, schreibt in Stichworten die Schüleraussagen an)

Schüler (unterhalten sich untereinander, nicht transkribierbar)

Mit der Lehrerfrage nach konkreteren Zusammenhängen zwischen Kraft und Bewegung, d.h. nach formelmäßigen Aussagen, sind die Schüler in dieser Phase überfordert. Der Lehrer erwartet, daß die Schüler einen Satz der Form " $v \propto F$ " aufstellen. Lorenz greift statt dessen ein Beispiel auf, das in der Kinematik ausführlich behandelt worden war. Seiner Beschreibung des waagerechten Wurfs unterliegt das Präkonzept 3-3 (Bewegung in Richtung der Überlagerung aller wirkenden Kräfte), wobei er voraussetzt, daß neben der Erdanziehungskraft eine weitere Kraft in der Horizontalen wirkt, denn gemäß P3-1 hat der geworfene Körper durch den Anstoß in der Waagerechten eine Kraft bekommen.

Rainer sieht keine von außen angreifende Horizontalkraft (das hatte Lorenz auch nicht gemeint). Da Rainer ebenso die Notwendigkeit einer zweiten Kraft neben

der Erdanziehungskraft verspürt, erklärt er die Bewegung selbst zur Kraft. Dadurch läßt sich die zusammengesetzte Bewegung als Folge der Überlagerung zweier Kräfte deuten und mit Präkonzept 3-3 in Einklang bringen. Typischerweise begründet Rainer die Annahme "Bewegung ist eine Kraft" (Präkonzept 3-1) dadurch, daß er auf Wirkungen verweist, die der bewegte Körper beim Stoß an anderen Körpern erzielen kann.

Markus versucht, zwischen Kraft und Bewegung zu differenzieren (Gegenbeispiel zu P3-1). Er geht, wie Thorsten, von der Umsetzbarkeit von Bewegung in Kraft aus. Bei ihm deutet sich jedoch eine noch intuitive Unterscheidung zwischen einer extensiven, speicherbaren Größe an, die mit der Bewegung verbunden ist, und einer intensiven Größe, die sich auf den Prozeß der Wechselwirkung bezieht. Wir werden bei späteren Äußerungen von Markus sehen, daß er Kräfte mit Bewegungsänderungen in Verbindung bringt (siehe Seite 505).

Lehrer Ich hoffe, daß ich das einigermaßen wiedergegeben habe, was ihr gesagt habt. Zuletzt ging es ja darum, was Rainer gesagt hatte: Bewegung ist eine Kraft. Markus meinte, das wäre so nicht ganz richtig. Das hätte zwar etwas damit zu tun, aber es wird umgesetzt - Bewegung wird in Kraft umgesetzt.

Rainer Dann eher umgekehrt: Kraft wird in Bewegung umgesetzt.

Markus Ja, ich bin ja auch davon ausgegangen, wenn das Auto gegen die Mauer fährt.

Lehrer Ja, bei dem Beispiel ist das dann Bewegung in Kraft. Und wie ist es, wenn der Wagen immer so weiterfährt?

Detlev Da wird die Kraft in Bewegung umgesetzt.

Lehrer Hängt das irgendwie von der Art der Bewegung ab, welche Kraft ich aufwenden muß? - - - Wenn ich also eine Kraft aufwende und einen Körper bewegen will, gibt das einen Zusammenhang zwischen der Art der Bewegung und der Kraft, die ich aufwenden muß, oder dem Körper, den ich bewegen will?

Andreas Aus welcher Richtung die Kraft kommt.

Lorenz Was ich bewegen will, welche Masse, welches Gewicht. Je schwerer der Körper ist, desto mehr Kraft brauche ich.

Jörg Das ist schon etwas anderes, ob ich ein Auto schiebe oder ob da ein Stein runterfällt.

Rainer und Markus einigen sich darüber, daß Kraft und Bewegung ineinander überführbar seien - je nachdem, ob ein Körper in Bewegung gesetzt werde oder aus seiner Bewegung heraus gegen ein Hindernis pralle. Diese Facette des Clusterbegriffs 'Kraft' (Präkonzept 3) ist wegen der meist tatsächlich mit dem Auftreten einer Kraft verbundenen Energieumwandlung besonders schwer zu problematisieren. Man kann sie physikalisch deuten als $\Delta \vec{p} = \int \vec{F} dt$ (für die "Umwandlung von Kraft in Bewegung"), bzw. $\vec{dp}/dt = \vec{F}$ (für Bewegung $\rightarrow$ Kraft),

darf dabei aber nicht außer acht lassen, daß Schüler bei der Umwandlungs-Vorstellung zumeist davon ausgehen, daß "etwas" (Kraft/Energie) direkt vom kraftausübenden auf den krafterfahrenden Körper übergeht und 'Kraft' ebenso wie 'Bewegung' als extensive Größe aufgefaßt wird, nämlich als speicher- und austauschbare, potentielle und aktivierte Wirkungsfähigkeit (vgl. Punkt B.3.3.2.1).

Detlev meint, auch während einer fortschreitenden Bewegung werde Kraft umgesetzt. Das entspricht dem Präkonzept 3-1: Ein bewegter Körper besitzt eine gespeicherte Kraft, die er zum Aufrechterhalten seiner Bewegung einsetzt und die dabei verbraucht wird. P3-1 hat starke Bezüge zum physikalischen Energiebegriff (vgl. Punkt B.3.3.2.2).

Die Lehrerfragen in der Mitte des zitierten Abschnitts locken die Schüler auf eine Fährte, die zu den Hypothesen "v prop. F" und "F prop. m" führt. In den Formulierungen geht es um eine Kraft, die "ich aufwende, wenn ich einen Körper bewegen will". Dadurch wird das Zweckdenken (Denkrahmen 7) aktiviert. Wenn Kraftanwendung im Zusammenhang mit Bewegung ein Ziel hat, besteht es darin, dem Körper eine bestimmte Geschwindigkeit zu verleihen (In-Bewegung-Setzen) oder ihn über eine bestimmte Strecke zu verschieben. Man begibt sich gedanklich in die Lage desjenigen, der diese Kraft absichtsvoll ausübt. Bei der Erfahrung, daß alle Bewegungen gegen (Reibungs-) Widerstände erfolgen (Vorverständniselement E1) liegt die Hypothese F prop. Gewicht oder Masse nahe. Sie steht an sich nicht im Widerspruch zum Newtonschen System, solange man von einer Einzelkraft ausgeht, denn der Satz $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ (mit $\vec{F} = \vec{0}$ bei $\vec{v} = \text{const.}$) bezieht sich nur auf die resultierende Kraft. Die körperliche Anstrengung ist abhängig von der Endgeschwindigkeit, die "ich" dem Körper geben "will". Das legt wiederum die Deutung nahe, daß F proportional zu v ist, denn Kraft wird häufig als eine extensive Größe aufgefaßt. Das Element des Zeitraums der Kraftausübung spielt für Kräftebilanzen bei Schülern keine Rolle. (Siehe dazu die Ergebnisse Jungs, die unter Punkt C.2.12 referiert sind.)

Es folgt im Unterricht eine längere Passage, in der Mike seine Sichtweise der Umwandlung von Kraft und Bewegung entwickelt. Als Lesehilfe stellen wir die Interpretation seiner Aussagen voran. Mike meint, daß die Kraft, die auf einen ruhenden Körper ausgeübt werde (z.B. wenn man gegen eine Kugel tritt), betragsmäßig von diesem gespeichert werde: "Die Kraft ..., die auf das Auto wirkt, muß irgendwann gleich sein mit der Bewegung". Während der Bewegung werde die Kraft eingesetzt, um die Bewegung voranschreiten zu lassen. Die Bewegung dauere so lange an, bis alle gespeicherte Kraft umgesetzt worden sei. Die Beschreibung Mikes beruht auf dem Präkonzept 3-1 ("Ein bewegter Körper hat Kraft").

- Mike Wenn man davon ausgeht, daß Kraft in Bewegung umgesetzt wird, dann muß die Kraft, oder Energie, irgendwann mit der Bewegung gleich sein. Ich meine, daß die Bewegung soviel Energie in sich hat -
- Lehrer Nochmal. Ich hab' das nicht ganz verstanden, was du -
- Mike Wenn ich davon ausgehe, daß Bewegung gleich Kraft ist, dann muß die Kraft - eine Energie jetzt - die auf das Auto wirkt, irgendwann gleich sein mit der Bewegung.
- Lehrer Was hätte das z.B. für Konsequenzen? Das ist mir ein bißchen abstrakt. Wenn z.B. eine Kugel rollt, was hat das für Konsequenzen?
- Mike Wenn die Kugel rollt, dann hat die Kugel doch Kraft in sich, die sie umsetzen kann, und das tut sie ja auch.
- Lehrer Wie denn?
- Mike Z.B. indem sie rollt. Dadurch wird sie langsamer.
- Lehrer Hm. Das ist also - Bewegung in Kraft sagtest du - und dann kann sie sich dementsprechend bewegen, wieviel Kraft sie in sich hat. Ist das so richtig?
- Mike Z.B. wenn ich jetzt gegen so eine Kugel trete, oder so, dann hat die ja in dem Augenblick, in dem ich gegentrete, soviel Kraft in sich, wie ich gegentrete - also mit der Kraft, mit der ich gegen die Kugel stoße.
- Lehrer Und was hattest du noch weiter gesagt? Du hattest ja auch eine Theorie aufgestellt, wie das kommt, daß die einmal anhält. Kannst du das nochmal -
- Mike Wenn ich das noch zusammenkriege. Also, wenn die Kugel rollt, hat sie ja eine gewisse Bewegung in sich. Ich würde sagen, daß die Kugel während des Rollens Bewegung in sich hat. Die gibt sie irgendwie ab, z.B. durch Widerstand, Rollwiderstand oder so, Luftwiderstand usw. Dadurch, daß die Energie abgegeben wird, bzw. die Kraft, wird sie langsamer.
- Lehrer Hm. Kraft ist also in der Bewegung drin. (schreibt das an die Tafel)
- Lorenz Ich versteh' das nicht. Er sagt jetzt, die Kraft ist in der Kugel drin. Wie wirkt sich die denn aus, wenn die Kugel steht?
- Mike Ich sage ja, während der Bewegung. Wenn die Kugel steht, bewegt sie sich doch nicht, das ist doch klar. Das ist keine Bewegung an sich mehr. - - - Wir sind davon ausgegangen, daß die Bewegung an sich irgendwo, irgendwie gleichzusetzen ist mit einer Kraft.
- Ulf Ich würde sagen, eine Kugel kann keine Kraft haben. Die kann höchstens Energie haben, und die Kraft wirkt auf die Kugel, aber die Kugel hat keine Kraft.

Lorenz interpretiert die Kraft, "die in der Kugel drin ist", nicht wie Mike als übertragenes Bewegungsvermögen, sondern als wesensmäßige Eigenschaft, "Potenz" der Kugel. Das widerspricht dem Aktivitätsdenken (Präkonzept 4). Die Kugel kann als "toter" Körper nicht an sich aktiv sein. Deshalb fragt Lorenz danach, wie sich denn diese angebliche Kraft auswirke, wenn die Kugel stehe. Auch Ulfs Einwand kann man darauf zurückführen, daß er der "toten" Kugel keine Kraft als wesensmäßige Eigenschaft zuerkennen will. Der Einwand wäre

demnach auf eine spontane Assoziation zum Stichwort "Kraft" zurückzuführen, dessen primäre Belegung mit "Körperstärke" wir im Assoziationstest ATK ermittelt haben (vgl. Denkrahen 5 "Eigenschaftsdenken"; Punkt B.3.2.2.1).

Mike hat in seinen Ausführungen statt "Kraft" auch das Wort "Energie" verwendet, um das zu bezeichnen, was die Kugel beim Stoß aufnimmt und während der Bewegung wieder abgibt. Die Austauschbarkeit der Namen für das "Etwas", was bei mechanischen Prozessen ausgeübt, ausgetauscht und umgewandelt wird ("Kraft als allgemeine Wirkungsfähigkeit; Präkonzept 3), zeigt sich auch in seinen folgenden Bemerkungen. Mike wiederholt darin seinen Grundgedanken, spricht diesmal aber von "Energie", die der Körper durch das Anschubsen bekomme. Bei Arnim blitzt kurz die "Katalysator-Vorstellung" von Kraft auf, die wir im Rahmen des Präkonzepts 3 mitbehandelt haben (siehe Seite 280).

Lehrer Was ist denn der Unterschied zwischen Kraft und Energie? Mike hatte ja meistens Kraft und manchmal Energie gesagt.

Arnim Ich würde sagen, Bewegung ist nicht Kraft, sondern Bewegung ist Energie. Und verschiedene Energieformen können durch Kraft in andere Energieformen umgewandelt werden.

Lehrer (sammelt die Schüleräußerungen an der Tafel)

Schüler (unterhalten sich untereinander) ... Wärme ... dann entsteht Wärme ... Arbeit in Energie ...

Lehrer (liest vor) Verschiedene Energieformen werden durch Kraft ineinander umgewandelt.

Arnim Nein, durch Arbeit - durch Arbeit umgewandelt.

Lehrer (schreibt das an) Können wir das irgendwie systematisieren, damit wir zu einer einheitlichen Ansicht kommen, wodurch die Bewegung verursacht wird. - - (...) Wenn ein Körper sich bewegt, was kann man da für Gesetzmäßigkeiten aufstellen?

Mike Erhaltung der Energie.

(Es folgt eine Passage, die wegen schlechter Qualität der Bandaufzeichnung nicht transkribiert werden konnte.)

Lehrer (holt aus dem Vorbereitungsraum einen Holzklötz und verschiedene Kraftmesser) Wenn ich so einen Klotz rumschiebe, wie ist das mit der Erhaltung der Energie? Oder wenn ich einer Kugel einen Schubs gebe - das ist das, was Mike vorhin gesagt hat. Kannst du das nochmal sagen, was du mit Erhaltung der Energie meinst?

Mike Durch den Schubs kriegt die Energie. Und durch die Reibung nimmt die Energie ab.

Lehrer Die bleibt dann doch nicht erhalten, wenn die abnimmt.

Mike Die wird abgegeben.

Lorenz Das ist doch so: Die kriegt bei dem Schubs eine Energie - eine größere Energie, die jetzt von dem Ding da abgegeben wird.

Mike Aber wenn du jetzt die Reibungsenergie abziehst -

Lorenz Sonst würde der Körper ja nicht - würde der ja nicht stehenbleiben, wenn da keine Energie abgegeben würde.

Mike Ja sicher. Aber wenn du die Reibungsenergie von der Energie abziehst, die du auf das Ding einwirken läßt, damit es in Bewegung kommt, hast du doch immer noch einen gewissen Satz von Energie.

Lorenz Und was ist, wenn das gleich ist?

Peter Wenn das gleich ist, dann bleibt es stehen.

Lorenz Darauf wollte ich ja hinaus. Also muß die Schubsbewegung, die Schubsenergie, größer sein.

Mike Das ist klar, daß die größer sein muß. Aber wie gesagt: Wenn du die beiden voneinander abziehst, hast du immer noch einen gewissen Satz übrig. Und was ist mit dem Satz Energie? Wird der abgegeben oder bleibt der in der Kugel?

Schüler (längeres Schweigen)

Betrachten wir das Gespräch zwischen Mike und Lorenz einmal näher. Obwohl sie sich vordergründig zu verständigen scheinen, fungieren unterschiedliche Vorverständniselemente und die Schüler sprechen von verschiedenen Dingen. Mike verwendet "Energie" weitgehend in der physikalischen Bedeutung. Der Körper bekommt beim Anschubsen kinetische Energie, die sich allmählich thermisch umwandelt ("Reibungsenergie"). Wenn der Körper zur Ruhe kommt, ist für Mike die betragsmäßige Gleichheit der zu Anfang vorhandenen kinetischen Energie und der am Schluß aufsummierten Reibungsenergie gegeben. Mike argumentiert auf der Grundlage von Präkonzept 3-1, nach dem ein bewegter Körper Kraft (/Energie) hat, die ihn u.a. zur eigenen Fortbewegung befähigt.

Lorenz sieht dagegen ein Kräfteressen zwischen der "Schubsenergie" und den Bewegungswiderständen. Durch das Anschubsen wird dem Körper die Fähigkeit gegeben, sich gegen die Widerstände durchzusetzen: "Die Schubsenergie muß größer sein" (unausgesprochen: "als die Widerstände"). Im Laufe der Bewegung nimmt die Schubsenergie ab, und der Körper bleibt stehen, wenn er sich nicht mehr gegen die Widerstände durchsetzen kann. Das ist ebenfalls dann gegeben, wenn die "Schubsenergie" gleich den Widerständen ist - diesmal jedoch auf denselben Zeitpunkt bezogen. Man darf sich durch die Wortwahl von Lorenz nicht verwirren lassen. Er meint mit "Schubsenergie" eine 'Kraft' des bewegten Körpers in Bewegungsrichtung nach Präkonzept 3-2.

Mike sieht den Vorgang in einer globalen Betrachtungsweise (Denkrahmen 10 "Globales Denken/Ursprungseinbeziehung") und aktiviert, wie Viennot es beschrieben hat (vgl. Punkt C.2.2), eine Vorstellung, in der Kraft als übertrag- und umsetzbare extensive Größe auftritt (Präkonzept 3-1, mit Nähe zum physikalischen Energiebegriff). Lorenz dagegen betrachtet jeweils lokal, ob die

Kraft/Energie des Körpers noch ausreicht, sich gegen die Widerstände durchzusetzen (P3-2).

Wir übergehen eine Passage, in der über kinetische Modelle für Wärme gesprochen wird. Der Lehrer leitet anschließend zur Ausgangsfrage zurück:

Lehrer Was verursacht Bewegung? Einmal haben wir gesagt, daß, wenn sich etwas bewegt, da irgendeine Energie drin ist - oder Kraft, das wurde auch gesagt. Aber wie kann ich überhaupt diese Bewegung verursachen? Wovon hängt das ab, wie sich das Ding bewegt? Da waren ja schon ein paar Aussagen, z.B. wie eine Kraft angreift. Das hatte Andreas gesagt. Oder wie schwer das Ding ist. Wie wird denn da der Zusammenhang sein, wenn man einen Körper mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegen will? Wenn man dem eine bestimmte Geschwindigkeit geben will, was muß man denn aufbringen?

S Eine bestimmte Kraft.

Lehrer Und wovon hängt die ab, diese Kraft? - - Ich will jetzt dieses Ding (Holzklotz) mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit hier längsziehen. Wovon wird das abhängen? Wieviel Kraft brauche ich?

Der Lehrer erwartet als Antworten "Gewicht/Masse" und "Geschwindigkeit". Er rechnet damit, daß die Schüler für Kraft und Bewegung eine Beziehung der Art " $F = m \cdot v$ " vorschlagen. Diese Hypothese soll im weiteren Verlauf der Stunde durch Real- und Gedankenexperimente erschüttert werden, um am Ende den Trägheitssatz zu formulieren. Dem Lehrer ist aus seiner Unterrichtserfahrung bekannt, daß Schüler eher an eine Proportionalität zwischen Kraft und Bewegung statt zwischen Kraft und Beschleunigung denken (Präkonzept 3-2). Er verfolgt methodisch den Ansatz, die Schülervorstellungen im Unterricht direkt anzusprechen, damit sie bewußt von den physikalischen Konzepten abgegrenzt werden können. Der Unterricht befindet sich in einer Phase, in der es um die Bewußtmachung der Schüler-Präkonzepte geht.

Das Phänomen des Ziehens eines Holzklotzes wurde vom Lehrer ausgewählt, um daran die Hypothese " $F \text{ prop. } v$ " zu problematisieren. Es kommt ihm dabei nicht auf die Feinheiten des Experiments an, sondern mehr auf eine daran anschließende prinzipielle Diskussion des Theorieansatzes. Wir werden sehen, daß die Schüler sich dagegen auf das Phänomen an sich konzentrieren. Gemäß dem allgemeinen Interesse an Einzelphänomenen (Vorverständniselement AII) achten sie eher genau auf die Randbedingungen der Durchführung des Experiments und die konkret zu variierenden Parameter, als daß es unter dem Gesichtspunkt möglicher Argumente für oder gegen den Theorieansatz $F = m \cdot v$ betrachten. Diese Hypothese wurde von den Schülern noch gar nicht explizit ins Auge gefaßt.

Rainer Von dem Widerstand - von der Reibung, die da -

Lehrer Ja, von dem Widerstand hierzwischen.

S Ja, der Widerstand, das ist ja die Reibung zwischen dem Tisch und dem Ding da. Wenn man das schmiert, geht das leichter.

Lehrer (schreibt stichwortartig an der Tafel mit)

Schüler (unterhalten sich lebhaft untereinander) ... Reibung ... Widerstand ... Seife ...

Lehrer Also, wie Geschwindigkeit und Kraft abhängen, wie kann man das noch -

Ludwig Moment mal, vom Gewicht doch auch - also, Masse.

Während die Schüler sich darüber unterhalten, wie man die Reibung zwischen Klotz und Unterlage ändern könnte, befestigt der Lehrer am Holzklotz einen Kraftmesser (Federwaage) und zieht ihn mit verschiedenen Geschwindigkeiten über den Tisch. Der damals anwesende Verfasser meint, daß man (bei entsprechendem Vorverständnis und daraus resultierenden Erwartungen) sehen konnte, daß während der Abschnitte mit einigermaßen konstanter Geschwindigkeit die Zugkraft in etwa gleich war. Die Schüler sahen dasselbe Experiment entsprechend ihren Vorverständnissen jedoch anders, wie die folgenden Beschreibungen zeigen:

Lehrer Was war da zu sehen, wenn ich das mit einer bestimmten Geschwindigkeit ziehe? Darum bemühe ich mich jedenfalls.

Detlev Wenn die Kraft kleiner wird, dann bleibt das Ding stehen. Und wenn sie größer wird, dann wird das immer schneller.

Lorenz Daß die Anfangsenergie, die man braucht, um das Ding in Bewegung zu setzen, größer ist als die Energie, die das Ding nachher bei der Bewegung hat.

Peter Die Bewegung ist von der Kraft abhängig. Je größer die Bewegung ist, desto größer muß auch die Kraft sein.

Lehrer Was meint ihr jetzt mit größerer Bewegung?

Schüler Schneller!

Lehrer Schneller, ja. Also F proportional v , je schneller, desto mehr Kraft.
- - Ich zeige das nochmal. (führt Versuch erneut vor) Wenn ich schneller ziehe, dann - (wird von Lorenz unterbrochen)

"Was da zu sehen ist", bzw. was wahrgenommen wird und wie es gedeutet wird, hängt entscheidend vom Vorverständnis des Betrachters ab. Der Lehrer meint, man habe sehen können, daß bei konstanter Geschwindigkeit ("darum bemühe ich mich") F nicht von der Geschwindigkeit abhängt. Detlev bezieht sich auf die Beschleunigungsphasen zu Anfang und am Ende der Bewegung. Aufgrund der anfänglichen Haftreibung kann der Eindruck entstehen, daß die Geschwindigkeit steige, weil die Kraft größer werde. Am Ende, wenn die Zugkraft sukzessive kleiner wird als die Gleitreibungskraft, scheint ebenfalls zu gelten, daß v proportional F ist. Die Wahrnehmungen und Beschreibungen von Detlev und Peter

beruhen auf dem Präkonzept 3-2. Lorenz bezieht sich vermutlich auf die Beobachtung, daß der Kraftmesser während der ersten Beschleunigungsphase stärker ausgezogen ist als während der gleichförmigen Bewegung.

Bevor der Lehrer dazu kommt, anhand einer erneuten Durchführung auf die ihm wichtig erscheinende Beobachtung zu verweisen, wird er von Lorenz unterbrochen, der eine bessere, genauere Versuchsanordnung vorschlägt.

Lorenz Wieso machen wir das nicht mit einer Rolle und einem kleinen Gewicht und lassen das dann runterfallen.

Lehrer Wie?

Lorenz Jetzt haben wir doch Holzklotz und Kraftmesser, und an der anderen Tischkante machen wir eine Rolle dran und ein kleines Gewicht. Dann würde das ja ein Stück fahren. Und wenn das Gewicht zu klein ist, bleibt es stehen irgendwann.

Lehrer Und was willst du damit rauskriegen?

Lorenz Dann kann man das ein bißchen genauer machen, als wenn Sie da so mit der Hand rummachen.

Lehrer So genau wie ich das mache! Gut, aber wir können das machen. (holt Geräte) Und was soll ich jetzt machen?

Lorenz Jetzt am Klotz ein Band dranhängen und dann ein Gewicht dran. Dann können wir ja ausprobieren - erstmal ein kleines Gewicht, dann ein größeres Gewicht.

Ludwig Und den Kraftmesser noch dazwischen.

Lorenz Ja klar, damit -

Lehrer Warum?

Ludwig Ja, damit - ich weiß auch nicht genau warum, aber irgendwie -

Lehrer Das gefällt dir einfach, oder was?

Ludwig Ja, irgendwie - die Gewichte bewirken doch, daß gleichmäßig gezogen wird -

S 1 Das Gewicht, das beschleunigt doch auch.

Lehrer Was hat das mit Beschleunigung jetzt noch zu tun?

S 2 Den Kraftmesser müssen Sie noch dazwischenlassen, sonst kann man nichts ablesen.

Lehrer Und jetzt soll ich da ein Gewicht dranhängen? Nehmen wir 200 Gramm. (führt Versuch durch) Und was sieht man?

Ludwig Es bewegt sich.

Lehrer Und was haben wir davon? Das war der Vorschlag, den ihr gemacht habt.

Der Lehrer ist erkennbar mit dem Unterrichtsverlauf unzufrieden. Im Mitschnitt läßt sich das am Tonfall seiner Aussagen ablesen. Seiner Meinung nach lenkt Lorenz' Vorschlag vom "Kern der Sache", nämlich von der Hypothese $F = m \cdot v$ ab. Er gibt zu erkennen, daß er von den Schülervorschlägen nicht viel hält -

z.B. in seiner letzten Äußerung "Und was haben wir davon? Das war der Vorschlag, den ihr gemacht habt" (Hervorhebung d.Verf.). Die Schüler wollen jedoch gerne einmal an dem Versuch etwas Konkretes messen: Wieviel Kraft braucht man, um diesen Klotz in Bewegung zu setzen? Für sie hat das Experiment einen Eigenwert, während es für den Lehrer nur im Hinblick auf den genannten Theorieansatz interessant ist.

S Jetzt haben wir gesehen, daß eine Kraft den Gegenstand bewegt hat. Das hat jetzt die Erdanziehungskraft bewirkt.

Lehrer Was kann man nun damit anstellen? Wir hatten doch eine Vermutung mit F proportional v , je stärker ich daran ziehe, desto schneller. Können wir das daran austesten? - - Was soll denn jetzt dieses Gerät (Kraftmesser) dazwischen?

Lorenz Wenn man jetzt da ein kleines Gewicht dranhängt und das würde sich dann auch bewegen, dann kann man - oder der Klotz würde sich nicht bewegen - dann kann man das ganz vorsichtig, meinetwegen zehngrammweise, ausprobieren. Und am Kraftmesser könnte man sehen, was für eine Kraft das ist und dann das Verhältnis überprüfen.

Lehrer (hängt nach und nach kleine Gewichtsstücke an) Jetzt passiert auch da nichts. - - Jetzt passiert wieder nichts. - -

Schüler Jetzt!

Lehrer Jetzt hört er schon wieder auf.

Schüler (lachen)

Lehrer Gut, jetzt ist immer noch die Frage: Was haben wir davon?

Der Unterricht wirkt in dieser Phase deshalb so zähflüssig, weil die Denkrichtungen der beteiligten Schüler und des Lehrers sich unterscheiden. Der Lehrer weiß nicht, worauf die Schülervorschläge hinauslaufen, was sie mit der "eigentlichen" Fragestellung, so wie er sie sieht, zu tun haben soll. Wir wollen versuchen, die unterschiedlichen Denkrichtungen aus unterschiedlichen Interessen zu rekonstruieren:

Schüler (Lorenz, Ludwig)

Interesse am Phänomen an sich
(Vorverständniselement AII)

Folgen für die Denkrichtung:

- generelle Fragestellung: Was kann man bei diesem Experiment im einzelnen untersuchen?
- es kommt auf eine sorgfältig geplante Anordnung an, die exakte Messungen ermöglicht
- man muß die Kraft genau messen
- die Reibung ist der bei der konkret

Lehrer

Interesse an der Diskussion eines
allgemeinen Theorieansatzes

Folgen für Denkrichtung:

- generelle Fragerichtung: Welche Phänomene sind geeignet, um die Hypothese $F = m \cdot v$ zu problematisieren?
- das gewählte Phänomen soll Anlaß sein, den postulierten allgemeinen Satz prinzipiell zu diskutieren, aufwendige experimentelle Untersuchungen sind nicht anzustreben

vorliegenden Anordnung der entscheidende Faktor, daher ist ihre Variation ins Auge zu fassen (Klotz mit Seife schmieren, auf Rollen stellen)

- die wichtigen Größen sind F , m und v , denn sie gehen in den allgemeinen Satz ein

Da der Lehrer die Schüler auffordert, ihre Vorschläge zur Gestaltung des Experiments mit dem Satz " $F \propto v$ " in Verbindung zu setzen, nennt Lorenz eine Möglichkeit zur Verallgemeinerung der erzielbaren Ergebnisse - allerdings nicht in Bezug auf " $F \propto v$ " sondern auf "Man braucht Kraft, um einen Gegenstand zu bewegen, bzw. in Bewegung zu setzen" (vgl. Präkonzept 3-2): Man könnte bei Klötzen verschiedener Masse jeweils ermitteln, wieviel Kraft notwendig ist, damit sie sich bewegen, und dann das Gewicht/die Masse mit der Kraft ins Verhältnis setzen.

Eigentlich denken die Schüler jedoch mehr an den konkreten Versuch als an eine Gesetzeshypothese. Tatsächlich ist der Reibungskoeffizient für die Fortbewegung schwerer Dinge, wie man sie im Alltag kennenlernt, von ausschlaggebender Bedeutung, denn die Masse des zu transportierenden Dings kann man in der Regel nicht ändern. Die Unterschiede in den Denkrichtungen, die durch unterschiedliche Interessenlagen mitbestimmt sind, zeigen sich noch einmal in den letzten Äußerungen vor der Pause. Während der Lehrer nach dem Einfluß der Masse fragt, denken die Schüler an Variationen der Reibungsverhältnisse.

Lehrer Was passiert, wenn ich ein noch schwereres Gewicht dranhänge? (führt Versuch durch) Passiert gar nichts! - - Da passiert gar nichts, obwohl ich inzwischen schon 600 Gramm drangehängt habe.

Ludwig Wie schwer ist denn dieser Klotz?

Lehrer Etwa ein Kilogramm.

Ludwig Vielleicht muß man dann auch 1 Kilogramm ranhängen. Dann müßte das funktionieren.

Lehrer (führt Versuch durch, Klotz bewegt sich) Also hängt das von der Masse ab, diese ganze Angelegenheit?

S 1 Ich würde sagen, von der Reibung hängt das ab, welche Geschwindigkeit der hat.

Lehrer Ihr sagt jetzt, das hängt von diesen beiden Flächen ab, der Unterlage und des Klotzes. Die ist aber gleichgeblieben. Wenn die gleich bleibt, wie geht dann die Masse da ein?

S 2 Ich würde sagen, wenn man das Ganze auf Räder - wenn man da einen Wagen drunterstellt - ist das Gewicht ja gleichgeblieben oder durch den Wagen noch schwerer geworden, und trotzdem rollt es dann besser, also mit weniger Kraft.

Lehrer Das ist, wenn ich die Reibungsverhältnisse ändere. Das war hier aber gleichgeblieben. Ich hatte hier einmal nur den Klotz und da reichten 150 Gramm, oder so. Und dann habe ich dieses Kilogewicht draufgestellt, und bei einem Kilo fing das ganz müde an. Wie hängen Masse

und Kraft, die ich aufwenden muß, um einen Körper zu bewegen, wie hängen die zusammen?

Detlev (Antwort akustisch nicht zu verstehen)

Lehrer Also, wenn ich mehr Masse habe, dann - (wird vom Klingelzeichen unterbrochen)

P A U S E

Nach der Pause steuert der Lehrer erneut auf den Satz $F = m \cdot v$, bzw. $v = F/m$ hin. Obwohl man davon ausgehen kann, daß gemäß dem Element P3-2 des thematischen Vorverständnisses die Vorstellung "Geschwindigkeit ist proportional zur wirkenden Kraft" bei vielen Schülern vorliegt, ist diese Denkweise noch nicht auf eine bewußte Ebene gehoben worden, auf der sie explizit diskutierbar wäre. Am Ende des ersten Teils der Doppelstunde galt die Aufmerksamkeit der Schüler nicht der Formalisierung eines spekulativen Theorieansatzes, sondern, wie wir gesehen haben, einer genauen Betrachtung des konkreten Phänomens (Vorverständniselement A11). Daraus erklärt sich das zögernde Eingehen der Schüler auf die Impulse des Lehrers, der am Beginn der zweiten Stunde behauptet, man könne das Ergebnis der vorhergehenden Stunde in der Gleichung $v = F/m$ zusammenfassen. Letzteres war sein Ziel und seine Wahrnehmung, aber nicht die der Schüler. Das Beispiel zeigt, daß ein Unterricht, der sich am Schülervorverständnis orientieren will, nicht nur spezifische Präkonzepte zu beachten hat. Übergreifende Denkraumen und Interessen spielen für die Denkrichtungen der Schüler eine ebenso wichtige Rolle.

Lehrer Wir hatten gesagt: F ist proportional v und m . Wie können wir das zusammenfassen? - - Wenn wir wissen wollen, wovon die Geschwindigkeit abhängt, wenn ich dieselbe Kraft aufwende und die Masse verdopple, was wird dann mit der Geschwindigkeit sein?

S 1 Was? Nochmal!

S 2 Wenn die Kraft gleich bleibt?

Lehrer Die Kraft bleibt gleich und ich verdopple die Masse. Was wird dann mit der Geschwindigkeit sein? - - Thorsten?

Thorsten Langsamer.

Lehrer Ja, die wird langsamer sein. v ist proportional F/m .

S 3 Das stimmt nicht, die Geschwindigkeit - (wird vom Lehrer unterbrochen)

Lehrer Das ist das, was wir so rausgekriegt haben - das heißt, das was ihr gesagt habt.

Schüler (durcheinander) ... ist mir noch nicht so ganz klar ... die Geschwindigkeit ...

Lehrer Für welche Bewegung stimmt das anscheinend, diese Beziehung da? - - - Für welche Bewegung stimmt diese Proportion v proportional F/m ?

S 1 Ich versteh das noch nicht.

Lehrer Wenn ich die Kraft konstant lasse und die Masse verdopple, was passiert dann?

S 1 Wird langsamer.

Lehrer Ja, und mehr steht da nicht. (...) Wir haben das hier bei den Klötzen festgestellt. Wir wollen jetzt einen kleinen Sprung machen und eine andere Bewegung angucken, nämlich eine Pendelbewegung.

Warum der Lehrer hier behauptet, beim Ziehen des Klotzes habe man v prop. F sehen können, ist uns nicht ganz klar. Ziel der weiteren Unterrichtsplanung ist jedenfalls die Problematisierung dieser These und die Einführung des Trägheitssatzes. Das Phänomen, an dem sich die Diskussion orientieren soll, ist das Galileische Hemmungspendel, bei dem in den von einem Fadenpendel überstrichenen Bereich ein Stab gehalten wird (siehe linke Abbildung). Läßt man kleine Reibungsverluste außer auch, dann schwingt die Pendelkugel trotz Hemmung auf

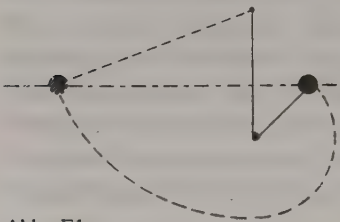


Abb. E1



Abb.: E2

die Ausgangshöhe zurück. Dieser Realversuch soll anschließend in einem spekulativen Gedankenexperiment auf das Herab- und Hinausrollen einer Kugel in einer geknickten idealen Schiene fortgeschrieben werden (siehe rechte Abbildung): Unabhängig vom Anstiegswinkel der rechten Schiene erreicht die Kugel stets wieder die Ausgangshöhe. Kippt man den rechten Schenkel schrittweise in die Horizontale, so vergrößert sich der Weg, den die Kugel auf ihm zurücklegt. Bei horizontaler Lage hört die Kugel nicht mehr auf zu rollen. Dieser Gang der Überlegungen soll zum Trägheitssatz hinführen.

So weit zur Planung des Lehrers. Er baut ein Fadenpendel auf - zunächst ohne Hemmung.

Lehrer Wenn ich hier die Kugel auslenke, was passiert dann drüben auf der anderen Seite? (läßt Kugel los)

Ludwig Eine verhinderte Fallbewegung.

Lehrer Warum denn verhindert?

Ludwig Ja, der wird durch den Faden gezogen - auf eine Bahn gezogen, die er gar nicht will, durch eine Kraft.

Lorenz Fies was?!

Der Lehrer versucht, auf den ihm wichtigen Punkt hinzulenken, auf die Steig-
höhe. Ludwig geht jedoch gleich auf die Dynamik der Bewegung ein. Daß er
dabei den Einfluß des Fadens auf die Kugel von sich aus als Kraft konzeptua-
lisiert, ist ein Gegenbeispiel zu Präkonzept 4, nach dem nur aktive (belebte,
bewegte) Körper Kräfte ausüben können. Der Kugel wird ein Willen zugespro-
chen, der durch die Fadenkraft gebrochen wird. Die Kugel erscheint fast als
ein fühlendes Wesen ("Fies was?!"). Das Sich-Hineinversetzen in einen bewegten
Körper, Ausdruck anthropozentrischer Denkweise, ist keineswegs auf die Sekun-
darstufe I beschränkt und tritt insbesondere bei Kreisbewegungen auf (vgl. Erfah-
rung 2 "Kurvenfahrten"; Punkt B.3.4.2)

Lehrer Was zwingt - ändert die Bewegung ab? Wenn er hier runtersaust und
da wieder hoch, was ist dann mit der Kraft los? Ihr hattet gesagt, eine
Bewegung braucht eine Kraft.

Ulf Ich würde sagen, das ist die Erdanziehungskraft.

Lehrer Wie lange wirkt die Erdanziehungskraft denn?

Jörg Die ganze Zeit.

Lehrer Und woher kommt dann die Kraft? - Was passiert in dem Bereich, wo
die Kugel wieder hoch geht?

Detlev Die Kraft, die die Kugel hat, ist dann mehr.

Lehrer Also die Kugel hat auch eine Kraft, und die -

Detlev Ja, also die Kugel hat betragsmäßig das Übergewicht und deshalb - Sie
hat eine Kraft, und die gleicht dann der Erdanziehungskraft, und
dadurch bewegt sie sich weiter - oder nein! Die ist größer!

Markus Sie bewegt sich weiter, da sie vor diesem Punkt (Tiefpunkt) eine
Geschwindigkeit erreicht hat und dann kann sie ja nicht bei dieser Ge-
schwindigkeit an diesem Punkt ruckartig stehenbleiben. Das geht nicht.
Sie bewegt sich weiter. Und weil sie immer so einen bestimmten
Abstand hat zu dem Stab oben (gemeint ist die Befestigung des Pen-
dels), dreht sie sich so rum. Bloß bei der Abwärtsbewegung wird sie
dann durch die Erdanziehungskraft gebremst.

Für Detlev ergibt sich eine Bewegung aus dem Wettstreit verschiedener Kräfte
(Präkonzept 3-3 "Bewegung in Richtung der resultierenden Kraft"). Beim Anstieg
überwiegt die "Kraft der Kugel" (Präkonzept 3-1 "Bewegte Körper haben Kraft")
die Erdanziehungskraft. Die Kugelfkraft resultiert aus ihrem Schwung, den sie
auf dem ersten Teil des Bogens erhalten hat. Die "Kraft der Kugel" wird kon-
struiert, um dem Präkonzept 3-2 gerecht zu werden: "In Richtung der Bewegung
wirkt eine Kraft".

Markus kann man eine entwicklungsfähige Trägheitsvorstellung unterstellen. Er
hat sich bereits früher gegen die These ausgesprochen, daß Bewegung eine Kraft
sei (siehe Seite 493). Markus nennt als Kraft nur die Erdanziehungskraft, die

den Geschwindigkeitsbetrag auf dem ansteigenden Bogen verringere. Die Richtungsänderung wird von ihm allerdings nicht auf das Wirken einer Kraft zurückgeführt, sondern aus den konkreten Gegebenheiten der Anordnung erklärt: Die Kugel muß immer einen bestimmten Abstand zum Drehpunkt einhalten.

Lehrer Und wenn sie dann hier wieder oben ankommt, was passiert dann mit den Kräften? Wir hatten gesagt, um eine Bewegung aufrechtzuerhalten, brauchen wir eine Kraft.

Lorenz Die wird weniger. Sonst würde sie ja immer weiterpendeln bis unendlich.

Ludwig Tut sie ja.

Lorenz Irgendwann bleibt sie im unteren Punkt stehen.

Ludwig Beweis mir das erstmal.

Lorenz Laß die mal pendeln, irgendwann kommt sie -

Lehrer Ihr könnt ja das Pendel einmal nachmittags aufstellen, von mir aus.
- Wie hoch kommt die Kugel denn jedesmal wieder?

Lorenz Die Höhe wird immer kleiner.

Lorenz verwendet "Kraft" in der Bedeutung von (Gesamt-) Energie. Wir haben damit bereits drei Zusammenhänge, in denen Schüler von "Kraft" sprechen:

- Newtonsche Kraft (Fadenkraft und Gravitationskraft, die am Pendelkörper angreifen)
- kinetische Energie ("Kraft der Kugel" während des Anstiegs)
- mechanische Gesamtenergie (die abnimmt, weil die Kugel sonst immer weiter pendeln würde)

Schüler benennen die aus physikalischer Sicht ganz unterschiedlichen Konzepte nicht nur mit dem gleichen Namen, sie sehen auch keine grundlegenden Bedeutungsunterschiede. Die verschiedenen Erscheinungsformen der 'Kraft' sind im Clusterkonzept von Kraft als universeller Antrieb aller Bewegungen miteinander verwoben (Präkonzept 3).

Lorenz wird während der Stunde immer wieder die Höhenverluste der Pendelkugel und später der in der gedachten Schiene rollenden Kugel ansprechen. Bei ihm fungiert das Realisationsdenken (Denkrahmen 1) besonders deutlich. Lorenz löst sich nicht von der "primären Erfahrung" (vgl. Künzli 1982, 18) und läßt sich nicht auf die spekulative Annahme einer unendlich andauernden Bewegungen ein. Beim vorgeführten Pendelversuch "sieht" er eine Amplitudenabnahme bereits nach wenigen Schwingungen. Man kann das aus der Beobachtung so kurzer Zeiträume jedoch ebensowenig belegen wie die gegenteilige Behauptung, die Amplitude bleibe konstant. Lorenz' Aussage beruht auf der gesicherten Alltagserfahrung, daß alle Bewegungen dem Einfluß von Widerständen unterliegen. Ludwigs provokative Entgegnung, Lorenz solle erstmal beweisen, daß das Pendel stehenbleibe,

kann als scherzhafte Herausforderung seines befreundeten Tischnachbarn aufgefaßt werden.

Lehrer Und woran liegt das?

Markus Irgendwann wird die Geschwindigkeit immer kleiner. Das liegt daran - ich würde sagen, das liegt am Luftwiderstand und an der Reibung - der Schnur auch.

Rainer Ohne Widerstand würde das niemals stoppen.

Lehrer Warum meinst du das?

Rainer Weil - die stärkste Wirkung auf die Kugel ist, wenn die ganz unten ist, wenn die senkrecht nach unten geht. Wenn wir das so pendeln lassen, ist die Bewegung nicht mehr so stark wie die Anfangsbewegung.

Lehrer Warum?

Rainer Ja, weil dann wieder die Erdanziehungskraft auf die Kugel wirkt. Das ist praktisch nur die Erdanziehungskraft, die darauf einwirkt. Deswegen verlangsamt sich das, bis es dann wieder am nächsten am Erdmittelpunkt ist.
(Rainer wird während seiner Ausführungen immer leiser)

Lorenz Sonst hätte man das perpetuum mobile.

Rainers Ausführungen begründen eine Amplitudenabnahme, nicht eine unendlich andauernde Pendelbewegung, die er in seiner ersten Aussage angesprochen hat. Am immer leiser werdenden Tonfall ist zu erkennen, daß Rainer sich dessen auch bewußt wird. Sein Denken ist von der Erfahrung geprägt, daß jede sich selbst überlassene Bewegung einmal zur Ruhe kommt (Erfahrung 1 "Bewegungswiderstände"). Selbst wenn er sich bemüht, Luft- oder sonstige Reibungseffekte aus dem Spiel zu lassen, führt ihn dieses fungierende Vorverständniselement letztlich zu dem Ergebnis, daß die Pendelkugel einmal stehenbleibe. Rainer macht dafür ersatzweise die Erdanziehungskraft verantwortlich (vgl. Präkonzept 5, mit der darunterfallenden Vorstellung, die Erdanziehung entzöge einen Teil der Bewegungsenergie irreversibel).

Lehrer Ich will das jetzt mal ein bißchen ändern. (baut Hemmung ein) So, jetzt habe ich hier einen Stab dran. Was passiert mit der Kugel auf der anderen Seite? Ändert sich etwas am Bewegungsablauf?

Bernd Das ist eine andere Pendelbewegung.

Thorsten Das kriegt einen neuen Mittelpunkt für die Pendelbewegung.

Lehrer Und wenn man beobachtet, wie hoch die auf der anderen Seite wieder kommt? (führt Versuch nochmal vor)

Klaus Da kriegt sie einen Überschlag.

Thorsten Kommt auf dieselbe Höhe.

Lehrer Also, wenn ich das Ding (Stab als Hemmung) wegmache, ist das nach Thorsten egal. Das hat keinen Einfluß. Seht ihr das auch so?

Ulf Wir sehen das auch so, aber wir glauben das nicht.

Wir interpretieren Ulf's Äußerung folgendermaßen: "Es sieht so aus, als komme die Kugel wieder auf die gleiche Höhe, und darauf wollen Sie mit dem Experiment wohl auch hinaus, sonst würden Sie nicht in der Weise nachfragen. Aber eigentlich kann ich mir das nicht vorstellen. Es widerspricht meinen Erfahrungen."

Für den Lehrer ist die Feststellung, daß das Pendel trotz Hemmung wieder auf die gleiche Höhe kommt, ein sinnvolles Ergebnis im Rahmen des Energieerhaltungssatzes bei Vernachlässigung der relativ geringen Reibungsverluste, die ihm bei diesem Demonstrationsversuch angemessen erscheint. Beim nachfolgenden Gedankenexperiment soll die Reibung ohnehin ausgeklammert werden (ideale Schiene).

Lehrer Was hat das mit glauben zu tun? Was glaubst du dabei nicht?

Ulf Ich weiß nicht. Ich kann mir vorstellen, daß es da nicht so oft schwingt - daß es da schneller abnimmt.

Lehrer Warum meinst du das?

Ulf Vielleicht ist da mehr Reibung, was weiß ich.

Der Stab stellt für Ulf einen Widerstand da. Er hemmt die freie Bewegung des Pendels. Widerstände verzehren Kraft/Energie. Also muß "es schneller abnehmen".

Der Lehrer weist nun eindringlich darauf hin, daß unter der idealisierenden Annahme von Reibungsfreiheit die Kugel auf die Ausgangshöhe zurückschwingt. Ebenso reibungsfrei solle ein gedachter Versuch sein, bei dem eine Kugel in einer geknickten Schiene herunter- und wieder hinauflaufe. Der Lehrer macht eine Tafelskizze des Gedankenexperiments (vgl. Abbildung E2, Seite 504).

Lehrer Wenn ich hier eine Kugel runterrollen lasse, wie weit rollt die Kugel auf der anderen Seite?

Rainer Das muß man unten rund machen.

Lehrer Ja gut, machen wir das so rund. (rundet in der Tafelskizze den Übergang zwischen den beiden Schenkeln ab)

Schüler ... niedlich ... ausgebügelt ...

Lehrer Wie hoch kommt die Kugel jetzt auf der anderen Seite?

Schüler ... nicht so hoch ... einen Zentimeter weniger vielleicht ...

Die Schüler stellen sich vor, wie der Versuch mit der Kugelschiene ablaufen würde, wenn man ihn tatsächlich durchführte. Sie nehmen das Gedankenexperiment in seiner beabsichtigten Funktion als Anlaß für kreativ-spekulative Überlegungen nicht an. Es fungiert das Vorverständniselement D1 "Realisationsdenken". Für Rainer geht es nicht einfach um eine Übertragung prinzipiell

gleicher Überlegungen vom Hemmungspendel auf das Gedankenexperiment. Er sieht eine neue Versuchsanordnung, über deren Bau er sich Gedanken macht. Wir haben eine ganz ähnliche Reaktion von Studenten auf eine Übungsaufgabe, bei der zwei schiefe Ebenen ohne abgerundeten Übergang aneinanderstießen, unter Punkt B.3.2.1.1 (Denkrahmen 1) diskutiert - auch hinsichtlich der Berechtigung der Einwände. Für den Lehrer ist die Frage des Übergangs unbedeutend, denn er sieht das diskutierte Problem ohnehin als Gedankenexperiment, bei dem man die konkrete apparative Umsetzung zunächst außer acht lassen kann.

In den Antworten auf die Frage, wie hoch die Kugel auf dem rechten Schenkel komme, legen die Schüler Wert auf die Feststellung, daß sie geringfügig unter der Ablaufhöhe bleibe. Man kann die geringe Höhendifferenz, die bei einer realen Durchführung des Experiments unvermeidlich auftreten würde, unter zwei Aspekten betrachten: Im Rahmen des Realisationsdenkens gehört sie zur genauen Beschreibung der primären Erfahrung und ist daher schwerlich zu vernachlässigen. Erfolgt die Betrachtung des Phänomens jedoch unter der Anleitung eines spekulativ vorweggenommenen theoretischen Entwurfs (hier des Trägheitssatzes), so erscheinen die Abweichungen vom "idealen" Bewegungsverlauf als marginale Begleiterscheinungen, die auf Unvollkommenheiten der Anordnung zurückzuführen und daher unwichtig sind. Hier steht die 99-prozentige Annäherung an den idealen Verlauf im Vordergrund, nicht die 1-prozentige Abweichung.

Die Schüler verfügen nicht über eine spekulative Vorwegnahme des Trägheitsprinzips. Sie betonen daher, daß die Kugel an Höhe verliere. Ihre Stellungnahmen erfolgen nicht auf der Grundlage eines anderen Theorieentwurfs (etwa einer Art zweitem Hauptsatz), sondern orientieren sich unmittelbar an der Erfahrung (siehe dazu Punkt B.3.2.1; Seite 131).

Ein Zitat aus den 'Discorsi' kann die unterschiedlichen Bewertungsmöglichkeiten für kleiner Abweichungen einer realen Durchführung von einer theoretischen Vorhersage verdeutlichen. Galilei verteidigt in der Person des Salviati die von ihm postulierte Unabhängigkeit der Fallgeschwindigkeit vom Gewicht eines Körpers gegen den Einwand des Peripatetikers Simplicio, ein Bleikorn falle aber nicht so schnell wie eine Kanonenkugel.

Simpl.: Eure Herleitung ist vortrefflich; und doch ist es mir schwer zu glauben, daß ein Bleikorn so schnell wie eine Kanonenkugel fallen soll.

Salv.: Sagt nur, ein Sandkorn so schnell wie ein Mühlstein. Ihr werdet, Herr Simplicio nicht, wie Andere, das Gespräch von der Hauptfrage ablenken und Euch an einen Ausspruch anklammern, bei welchem ich um Haaresbreite von der Wirklichkeit abweiche, indem ihr unter dieses Haar verbergen wolltet den Fehler eines Anderen von Ankertau-Dicke.

Aristoteles sagt, ein Eisenstab von 100 Pfund kommt von einer Höhe von 100 Ellen herabfallend in einer Zeit an, in welcher ein einpfündiger Stab frei fallend, nur eine Elle zurückgelegt hat: ich behaupte, beide kommen bei 100 Ellen Fall gleichzeitig an: Ihr findet, dass hierbei der größere um 2 Finger vorseilt. (...) Ihr wollt jetzt mit diesen zwei Fingern hinwegsmuggeln die 99 Ellen des Aristotelischen Fehlers, und nur von meiner kleinen Abweichung reden, den gewaltigen Irrthum des Aristoteles aber verschweigen.
(Galilei 1637, 59)

Galilei führt die auftretenden Unterschiede in den Fallzeiten auf eine "Trübung" der "reinen Wirkung der Schwere" zurück (vgl. Seite 435). Um einen reinen Effekt geht es dem Lehrer auch in unserer Fallstudie. Dafür ist von Rändererscheinungen wie geringen dissipativen Reibungskräften abzusehen. Genau dagegen sträuben sich jedoch die Schüler. Wiederholen wir die letzten Antworten auf die Frage, wie hoch die Kugel auf dem rechten Schenkel komme.

Schüler ... nicht so hoch ... einen Zentimeter weniger vielleicht ...

Lehrer (spricht Lorenz direkt an) Warum nicht? Wenn du jetzt genau diesen Versuch mit dem Pendel überträgst auf diese schiefe Ebene?

Lorenz Genauso hoch müßte die - Das geht aber nicht, nein, dann hört er ja nie auf, nein.

Lorenz beginnt, weil er direkt dazu aufgefordert wird, mit einer Übertragung des beim Pendel vom Lehrer herausgestellten Gesichtspunkts der Höhengleichheit auf das Schienen-Experiment: "Genauso hoch müßte die - ". Aber dann wird er sich bewußt, daß daraus eine unendlich andauernde Bewegung folgen würde. Das widerspricht seinen Erfahrungen. Lorenz ist nicht bereit, eine solche Annahme, gegen die er sich bereits beim Pendel ausgesprochen hat, auch nur als spekulativen Ausgangspunkt weiterer Überlegungen zu akzeptieren.

Detlev Natürlich geht das.

Lorenz Nein, dann hört der ja nie auf.

Detlev Wenn der jetzt wieder zurückpendelt, kommt der auf die gleiche Höhe, hat aber weniger Kraft.

Detlevs Ad-hoc-Einfall ist ein schönes Beispiel dafür, welchen internen Bearbeitungen physikalische Lehrinformationen bei der Wechselwirkung mit einem individuellen Vorverständnis unterliegen können (vgl. Abb. A1 auf Seite 9). Detlev unternimmt einen Versuch, "gleiche Höhe" und "Verluste" miteinander zu vereinen. Der Physik, bzw. dem Physiklehrer wird zugebilligt, daß die Kugel auf die Ausgangshöhe zurückschwingt. Da aber eigentlich "etwas" verlorengehen muß, hat die Kugel dann weniger Kraft. Lorenz erkennt jedoch die Inkonsistenz von Detlevs Aussage, denn gleiche Höhe bedeutet gleicher Schwung und damit gleiche Kraft (vgl. Präkonzept 3-1).

Lorenz Warum hat der dann weniger Kraft? Wenn der gleich hoch kommt, dann hat der doch den gleichen Schwung. Das geht doch nicht. Der müßte dann doch die ganze Zeit an diesem Punkt wieder ankommen.

Detlev Aber der wird doch abgebremst da. (deutet auf die Hemmung des Fadenpendels)

Klaus Der kommt nicht mehr so hoch.

Lorenz Der muß einen Zentimeter darunter - sonst geht das nicht.

Schüler (unterhalten sich untereinander über das Problem)

Der Lehrer erkennt, daß die Schüler den Übergang vom realen Pendelversuch auf eine gedachte Idealform desselben nicht vollziehen wollen oder können und daß sie sich das Gedankenexperiment mit der geknickten Kugelschiene als Realexperiment vorstellen. Er versucht eine Klärung:

Lehrer Man muß zwei Sachen unterscheiden: Einmal den realen Versuch - was wird dann passieren?

Rainer Dann bleibt er unten liegen nach einer gewissen Zeit.

Lehrer Aber es geht jetzt darum, diesen Versuch (Pendel), wo die Reibung unheimlich klein ist, zu übertragen auf eine schiefe Ebene. (...) Das soll eine Gedankenübertragung von dem Pendel auf die schiefe Ebene sein. Dann kommt das hier gleich hoch.

Lorenz Aber ich habe doch eben versucht zu zeigen - (wird vom Lehrer unterbrochen)

Lorenz akzeptiert die Darstellung des Lehrers nicht. Er hat die Aussage "gleiche Höhe" bereits für das Fadenpendel nicht anerkannt. Die Berechtigung der idealisierenden Betrachtungsweise, die der Lehrer propagiert, ist ihm nicht einsichtig. Die Idealisierung realer Vorgänge, ihre gedankliche "Reinigung", ist Schülern als konstitutive Methode der Physik bei der Konstruktion allgemeiner Gesetze wenig bekannt (zur Methode siehe Punkt B.2.3). Unsere Untersuchungen haben ergeben, daß Schüler meinen, physikalische Gesetze ergäben sich auf direktem Wege aus genauen Experimenten (siehe Denkrahen 4 "Physik liefert eindeutige Ergebnisse"). Wir haben bei der Diskussion des Denkrahmens 4 (Punkt B.3.2.1.4) ein Gespräch aus einem Grundkurs über die Wahrheit und Endgültigkeit physikalischer Gesetze dargestellt, das sich ebenfalls auf den Trägheitssatz bezog und an dem klar wurde, daß Schüler die Gültigkeit und den Sinn von Sätzen bezweifeln, die man nicht unmittelbar "ausprobieren" kann. Hierin besteht neben dem Realisationsdenken (Denkrahen 1) eine weitere Quelle der Widerstände gegen das Sich-Einlassen auf eine reibungsfreie Betrachtung, die in der vorliegenden Fallstudie zu beobachten ist.

Lehrer Ja, was muß man da unterscheiden? Du sagst, das kommt nicht gleich hoch. Warum meinst du das?

Lorenz Es muß ja irgendwann mal den unteren Punkt erreichen, wo die Erdanziehungskraft der Kugel am größten ist.

Lorenz sucht nach physikalischen Argumenten, die seinen Standpunkt stützen können. Er greift auf die Kenntnis zurück (Vorverständniselement K1), daß die Erdanziehungskraft höhenabhängig ist. Der Lehrer treibt Lorenz in die Enge. Der will schon aufgeben, als Jörg ihm beipflichtet:

Lehrer Warum ist sie da am größten? Warum ist sie da größer, als wenn die Kugel hier hängt?

Lorenz Ich sehe schon, der Versuch ist zum Scheitern verurteilt.

Jörg Das ist genau wie beim Magneten nämlich.

Lehrer Der Effekt, ob ich die Kugel hier habe oder hier oben, ist so klein - der ist nicht meßbar.

Jörg Aber trotzdem bleibt sie in diesen 3 Zentimetern weniger schließlich stehen.

Es ist schon erstaunlich, mit welcher Beharrlichkeit und Vehemenz sich besonders Lorenz gegen die Annahme wehrt, daß die Kugel wieder die Ausgangshöhe erreiche. Das Verhalten läßt sich nicht auf falsche Präkonzepte oder fehlende Kenntnisse zurückführen, sondern auf Denkraumen und Erfahrungen, die verhindern, daß das zur Diskussion gestellte Gedankenexperiment in der vom Lehrer intendierten Weise angenommen wird. Im wesentlichen handelt es sich dabei um das Realisationsdenken (Denkraumen 1) und die Vorstellung, die Physik leite ihre Gesetze direkt aus genauen Experimenten ab (Denkraumen 4), sowie um die Erfahrung 1, daß alle Bewegungen dem Einfluß von Widerständen unterliegen. Die Schüler würden sicherlich zustimmen, daß die Kugel auf ihre Ausgangshöhe zurückrollt, wenn man alle Reibungseffekte und sonstigen Realisierungsprobleme vernachlässigt. Es ist jedoch gerade diese Außerachtlassung gegen die die Schüler sich sträuben, denn alle Erfahrung sagt, daß das Pendel irgendwann einmal stehenbleibt. Erst die Lösung von der primären Erfahrung würde den Zugang zum Trägheitssatz eröffnen. Wir haben im historischen Kapitel Argumente von Aristoteles gegen die Existenz des Vakuums referiert (siehe Punkt D.3.3 ; Seite 420), die darauf hinausliefen, daß es das Leere schon deshalb nicht geben könne, weil unter solchen Bedingungen Körper sich ins Unbegrenzte weiterbewegen würden, und das stimme offensichtlich nicht. Daher sei die Annahme absurd. Lorenz' Argumentation hat ähnliche Züge.

Lorenz Die Kugel sucht ja immer das Lot auf.

Lehrer Ja, und woran liegt das?

Schüler (lachen) ... das wissen wir nicht ...

ThorstenWeil das näher zum Erdmittelpunkt ist.

Andreas Die Reibung ist viel größer, vor allem die Luftreibung.

Lehrer Durch die Reibung wird es sicherlich beeinflusst, wenn wir es als reales Experiment machen. Aber das soll ja auch keins werden. Das soll nur ein Gedankenexperiment sein. Das heißt, daß wir das Experiment mit dem Pendel auf die schiefe Ebene übertragen.

Andreas Wenn wir von der schiefen Ebene ausgehen, dann funktioniert das doch nicht. Warum nehmen wir nicht so ein großes halbes Rohr?

Jörg macht sich Gedanken darüber, wie man das Experiment am besten praktisch umsetzen könnte. Wenn solche Überlegungen dazu dienen, ein vorher gedanklich-spekulativ entworfenes Prinzip (Energieerhaltung) an einem besonders sinnfälligen Phänomen zu demonstrieren, läge eine "Realisationshandlung" im Sinne Holzkamps (1968) vor, die im Einklang mit der physikalischen Erkenntnisweise stünde. Realisationshandlungen sind nicht mit dem Vorverständniselement "Realisationsdenken" zu verwechseln. Letzteres läge vor, wenn Andreas lediglich auf seine praktischen Erfahrung zurückgriffe, daß bei Vornahme bestimmter Maßnahmen Bewegungen geringeren Widerständen unterliegen. Der gedankliche Schritt von reibungsarmen auf vollkommen reibungsfreie Vorgänge ist ein bedeutender qualitativer Schritt (siehe Punkt B.3.2.1; Seite 131), der Schülern schwer fällt.

Wir beenden damit die erste Fallstudie. Der Lehrer erreicht in den verbleibenden 15 Minuten sein Unterrichtsziel, die Einführung des Trägheitssatzes, nicht. Die Mehrzahl der Schüler bringt immer wieder den Einwand der Reibungsverluste vor, bzw. das Argument, während der Bewegung auf dem in die Waagerechte gekippten rechten Schenkel (vgl. Abb. E2 auf Seite 504) müsse "etwas" verbraucht werden. Nur 1 Schüler kommt zu dem Ergebnis, die Kugel rolle bis ins Unendliche weiter.

E.3 Fallstudie 2: Schülerverhalten in einem SVU über Stoßvorgänge

Die zweite Fallstudie stammt aus dem gleichen Leistungskurs wie Fallstudie 1. Der Zeitpunkt liegt 2 Wochen später. Das Unterrichtsbeispiel erstreckt sich diesmal über einen Zeitraum von 10 Stunden, die nach dem Konzept eines am Schülervorverständnis orientierten Physikunterrichts (SVU) gestaltet wurden. Die Methodik dieser Unterrichtsform ist mit Beispielen in Niedderer 1982a dargestellt. Auf der folgenden Seite wird ihre Phasenstruktur in einer tabellarischen Übersicht erläutert.

Die fachdidaktischen Überlegungen, die uns zur Form des SVU führten, kann man in 4 Thesen fassen:

1. Schüler werden bei der Verarbeitung der im Physikunterricht angebotenen Informationen von ihren individuellen Vorverständnissen geleitet (Grundthese unseres Forschungsprogramms, siehe Punkt A.1.1)
2. Die individuellen Vorverständnisse der Schüler und des Lehrers sind unterschiedlich. Daher werden sich die Beobachtungen, Frage-/Denkrichtungen und Ergebnisfixierungen, die Schüler in einem Themenbereich machen, vielfach von denen des Lehrers, bzw. von den Intentionen der Informationsangebote unterscheiden (siehe dazu Punkt A.1.3).
3. Alternative Konzeptualisierungen, die bei Schülern vorliegen werden, bleiben häufig aus zwei Gründen unerkannt:
 - sie bleiben unter formalen Fähigkeiten verdeckt (siehe dazu Punkt C.3, rechte Spalte der Tabellen) und werden daher vom Lehrer nicht immer erkannt
 - die Schüler selbst nehmen Unterschiede zwischen ihren Präkonzepten, Denkrahmen und Interessen zu denen der Wissenschaft Physik oft nicht wahr und setzen physikalische Begriffe mit Alltagsbegriffen gleichen Namens gleich (siehe dazu Seite 452)
4. Schüler werden sich vorhandener Unterschiede in den Denkweisen dann bewußt, wenn sie die Gelegenheit haben, ihre Gedankengänge weitgehend ohne Außensteuerung durch den Lehrer, d.h. auf der Grundlage ihres eigenen Vorverständnisses, zu einem gewissen Abschluß zu führen, so daß sie zu ihren Aussagen reflektiert Stellung beziehen können und auf Konsequenzen stoßen, die im Erfolg/Mißerfolg bei der Bearbeitung eines Problems bestehen und mit Befriedigung/Unzufriedenheit über das gewählte Thema und den Arbeitsprozeß verbunden sind. Dadurch werden Elemente des Vorverständnisses expliziert und auf eine Ebene gehoben, auf der es möglich ist, in einer anschließenden Phase des Vergleichs mit der Beschreibung des Themas aus Sicht der Wissenschaft Physik

Konzept eines am Schülervorverständnis orientierten Physikunterrichts (SVU)

- Allgemeine Merkmale:
- eigenständiges Arbeiten von Schülergruppen an selbstgewählten Fragestellungen
 - weitgehender Verzicht des Lehrers auf steuernde Eingriffe in die Arbeitsprozesse, auch wenn er bezüglich des behandelten Themas und der Vorgehensweise Bedenken hat
 - beim Vergleich der Schülerergebnisse mit dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand werden wissenschaftstheoretische Aspekte der physikalischen Erkenntnisgewinnung berücksichtigt
 - Unterrichtseinheiten nach dem Modell des SVU sollten ein- bis zweimal pro Schulhalbjahr durchgeführt werden und sich über 5 bis 10 Unterrichtsstunden erstrecken
 - die Bewertung der Schülerarbeiten erfolgt nicht nach der Übereinstimmung der Ergebnisse mit dem anerkannten physikalischen Erkenntnisstand, sondern nach der plausiblen Darstellung der eigenständigen Überlegungen der Schüler

PHASENSTRUKTUR

Phase	allgemeine Beschreibung	Lehrerverhalten
1. Vorbereitung (Normalunterricht)	Zur Vorbereitung zählt im Grunde der gesamte vorhergehende Unterricht, in dem allerdings ein bestimmter Inhaltsbereich (Versuch, Begriff, Anwendung) ausgespart wird. Die Vorbereitung soll experimentelles und theoretisches Werkzeug für eigene Arbeiten verfügbar machen.	Vorwiegend informierend, mit fragend-entwickelndem Unterrichtsgespräch.
2. Initiierung	Vorgabe eines Rahmenthemas, das einerseits möglichst offen ist, um Schülern Freiraum für eigene Ansätze zu geben, und andererseits die Schüler nicht völlig ohne Orientierungsmöglichkeiten läßt.	- Vorführung eines Versuchs ohne begleitende Erklärungen - Vorgabe einer groben Fragestellung und Geräteangebot
3. Durchführung	Der Arbeitsprozeß gliedert sich in Teile der Folge Problemfindung (Fragestellung, Hypothesen), Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung, Interpretation der Daten, Formulierung eines Ergebnisses. Da alle Arbeitsschritte von den Schülern eigenständig, auf der Grundlage ihrer Vorverständnisse durchgeführt werden sollen, dürfen Eingriffe des Lehrers nur sehr behutsam erfolgen.	- Zurückhaltung, besonders bezüglich der ausgewählten Fragestellungen, Versuchsbeobachtungen und Erklärungsansätze - zurückhaltende Hilfestellung bei technischen Problemen - Sicherstellung eines geordneten Arbeitsablaufs (z.B. Ausgabe von Materialien erst bei Vorliegen einer Versuchsplanung, Anforderung von Zwischenberichten)
4. Diskussion und Konsensbildung	Die Schülerergebnisse (meist unterschiedliche) werden vorgetragen. Sie sollten, wenn möglich, miteinander abgeglichen werden, so daß ein Konsens über gemeinsame Aussagen zum behandelten Rahmenthema hergestellt wird.	Der Lehrer agiert als Moderator. Er sammelt an der Tafel stichwortartig die Schüleraussagen und leitet das Gespräch. Inhaltlich sollte er sich zurückhalten. Er kann gegebenenfalls auf Inkonsistenzen hinweisen, sollte aber keine Argumente verwenden, die nicht schon vorher von Schülern eingebracht worden sind.
5. Vergleich mit dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand	Der Lehrer informiert über den Erkenntnisstand der Physik zum behandelten Rahmenthema. Bei Abweichungen zu den Schülerergebnissen wird die gegebenenfalls andere Herangehensweise der Physik begründet und in ihren allgemeinen Merkmalen beschrieben. Bei Vorliegen von Parallelen der Schülerergebnisse zu früheren physikalischen Theorien werden diese vorgestellt.	- Lehrervortrag - Einzelgespräche mit Gruppen über ihre Vorgehensweise und Ergebnisse - Einbringung von Informationen über frühere physikalische Theorieansätze (Originaltexte)
6. Reflexion	Schüler und Lehrer betrachten rückblickend die Vorgehensweisen der Gruppen bei der Findung und Bearbeitung der Fragestellungen und vergleichen sie mit analogen Prozessen in der Wissenschaft Physik.	Der Lehrer informiert über den Ablauf von Erkenntnis- und Konsensbildungsprozessen in der Wissenschaft Physik (wissenschaftstheoretische Aspekte).

Gemeinsamkeiten und Unterschiede zur Kenntnis zu nehmen und zu verarbeiten. Dabei kann es nicht darum gehen, bei der Vorlage von Unterschieden die Schüleraussagen als "falsch" und die physikalischen als "richtig" zu klassifizieren. Es geht vielmehr um den Erwerb der Fähigkeit, bewußt zwischen unterschiedlichen Zugriffsweisen auf Phänomene differenzieren zu können.

Die Unterrichtsform des SVU versucht, diesen Überlegungen Rechnung zu tragen. Sie ist daraufhin angelegt, Schülern viel Raum zu geben für die Suche und Festlegung eigener Untersuchungsziele (innerhalb eines Rahmenthemas), für eigene Versuchsplanungen und -durchführungen sowie für die Diskussion von Ergebnissen untereinander. Das erfordert vom Lehrer weitgehende Zurückhaltung bei Eingriffen in die Arbeitsprozesse der Schülergruppen. Er soll sich in den Phasen 3 und 4 (siehe Seite 515) auf die Rolle eines Moderators beschränken, der die äußeren Rahmenbedingungen sicherstellt: Bereitstellung von Material, begrenzte Hilfestellung auf Anfrage der Schüler, Sicherstellung eines geordneten Arbeitsablaufs (z.B. durch Einforderung von Planungspapieren und Zwischenberichten). Erst in der fünften Phase bringt er den Standpunkt der Physik ein. Dabei hat sich die Vorgehensweise bewährt, historische Originaltexte zu Vorläufern heutiger Theoriebestände bereitzuhalten, in denen oft Parallelen zu Schülerergebnissen zu finden sind, und sie einzusetzen, um den Schülern gegebenenfalls rückzumelden, daß ihre Arbeit trotz Abweichungen zum heutigen Erkenntnisstand durchaus physikalisch sinnvoll sein können.

Ein SVU kann unter zwei Aspekten betrachtet werden:

- als unterrichtsmethodische Konsequenz aus der Anerkennung der Bedeutung des Vorverständnisses für den Lernprozeß
- als Verfahren zur Erforschung von Vorverständniselementen.

In unseren empirischen Erhebungen waren die SVUs immer beides.

In der vorliegenden Fallstudie wollen wir die Rekonstruktion des Schülerverhaltens auf der Grundlage des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik angehen. Das vorliegende Material umfaßt Unterrichtsverlaufsprotokolle, Wortprotokolle aus Klassenunterricht und Gruppenarbeit, schriftliche Berichte von Schülern über Verlauf und Ergebnis ihrer Arbeiten sowie eine Befragung nach Abschluß des SVU. Der Umfang des Materials und die Dauer der Unterrichtseinheit bedingen, daß nicht über alle Schülergruppen und alle Stunden berichtet werden kann. Die Fallstudie soll aber neben Einzelbeschreibungen auch einen Überblick über den Gesamt Ablauf des SVU vermitteln. Die Gliederung orientiert sich daher an den 6 Phasen der Unterrichtsform.

Phase 1: Vorbereitung

Als Vorbereitung kann der gesamte vorhergehende Unterricht betrachtet werden. Die Kinematik wurde ausführlich an Fallbewegungen erarbeitet und anschließend am waagerechten und schiefen Wurf vertieft. In den Stunden unmittelbar vor dem SVU war über den Zusammenhang von Kraft und Bewegung gesprochen worden. Der Lehrer hatte dabei versucht, Schülervorstellungen explizit den Grundannahmen der Newtonschen Dynamik gegenüberzustellen. Aus dieser Phase stammt die Fallstudie I (Punkt E.2). Nach der Einführung des Trägheitsprinzips wurde der Satz $F = m \cdot a$ anhand von Experimenten auf einer Luftkissenfahrbahn vermittelt. Es schlossen sich Anwendungen des Satzes auf beschleunigte Bewegungen ab (Fahrstuhl, Atwoodsche Fallmaschine). Zur Vorbereitung eines SVU gehört auch das, was nicht behandelt wurde. So waren weder der Impuls- noch der Energiebegriff vorher Unterrichtsgegenstand.

Phase 2: Initiierung

Als Rahmenthema wurde vom Lehrer genannt: "Untersuchung von Stoßprozessen". Die Schüler wurden aufgefordert, Gruppen zu bilden und sich möglichst konkrete Fragestellungen und dafür angemessene Versuchsplanungen zu überlegen. Es konnten alle in der Sammlung vorhandenen Geräte verwendet werden. Weitere Erläuterungen betrafen die Dauer der Unterrichtseinheit (circa 2 Wochen), die Eigenverantwortung für Themenformulierung und Arbeitsgestaltung sowie die Bewertungspraxis, die sich nicht an formalen Übereinstimmungen mit Lehrbuchdarstellungen orientieren sollte, sondern an der plausiblen Darlegung der eigenständigen Überlegungen - auch wenn sie zu anderen Ergebnissen führten. Der abzugebende Arbeitsbericht sollte als Verlaufs- und nicht als Ergebnisprotokoll verfaßt sein.

Phase 3: Durchführung

a) Themenfindung

Die Schülergruppen hatten etwa 45 Minuten Zeit, um sich im Rahmenthema "Stoßvorgänge" eine bestimmte Fragestellung zu überlegen. Sie waren aufgefordert, zunächst alle Themen aufzuschreiben, die ihnen einfielen, unabhängig davon, ob sie später wieder verworfen würden. Die Durchsicht der Niederschriften und das Zuhören bei Gruppengesprächen ergibt folgendes Bild:

- a) Falleexperimente: Gegenstände aus Blei, Pappe usw. aus verschiedenen Höhen herunterfallen lassen und die Verformung der Körper messen. (in 2 Gruppen diskutiert)
- b) Zusammenstoß: "Wenn zwei Autos zusammenstoßen, wie die sich verformen." Versuchsidee: Knetgummistäbe als Modell für eine Knautschzone zusammen-

stauchen lassen.

(Zwischen Anführungszeichen gesetzte Passagen sind wörtliche Wiedergaben von Schüleraussagen und Niederschriften.)

- c) "Energieerhaltung": "Wenn ich einen Wagen auf einen gleichschweren anderen prallen lasse, müßte der sich mit der Geschwindigkeit des ersten weiterbewegen, und der erste müßte sich auch weiterbewegen - oder vielleicht auch nicht."
- d) Katapult bauen: "Verschiedene Körper (Massen, Formen) abschießen und gucken, wie weit das kommt, auch bei verschiedenen Abschußwinkeln."
- e) Kugel aufeinanderprallen lassen: "Welche Kraft geht dabei verloren."
- f) "Kraftübertragung" durch feste Körper: Kugel gegen einen Holzklotz prallen lassen, hinter dem sich eine zweite Kugel befindet. Die Geschwindigkeiten der beiden Kugeln sollen dann verglichen werden. Hypothese: unterschiedliche Materialien (Eisen, Holz, Schwamm) "schlucken unterschiedlich viel Kraft".
- g) Verschiebung eines Klotzes: Kugel gegen Klotz prallen lassen und dessen Verschiebungsweg messen. Damit soll die "Aufprallkraft" gemessen werden.
- h) Federdehnung: Kugel mit verschiedenen Geschwindigkeiten gegen ein Brett prallen lassen, das über Federn an einer Halterung befestigt ist, Ausdehnung der Federn messen.
- i) Zusammenstoß: Autos (Experimentierwagen, d.Verf.) aus verschiedenen Richtungen und mit verschiedenen Geschwindigkeiten zusammenstoßen lassen (frontal, seitlich, Auffahrunfall), an den Wagen Knetgummi anbringen und an dessen Verformung die Kraft messen. "Auf einen Wagen legen wir eine Kugel (Kopf des Fahrers, d.Verf.) - wie sich die Kugel beim Zusammenstoß verhält."
- j) Luft- und Rollreibung: "Veränderung von Luft- und Rollreibung bei verschiedenen Massen. Wir messen die Ausrollzeit und -strecke auf der Luftkissenfahrbahn und der schiefen Ebene."
- k) Pendelkugeln zusammenstoßen lassen: "Kugel an einem Pendel, die gegen eine andere Kugel knallt, untersuchen. Vergleich der Geschwindigkeit der Kugeln und der Höhen (Auslenkhöhen, d.Verf.)."
- l) "Energieübertragung": Ein fahrendes Auto (Experimentierwagen, d.Verf.) auf ein stehendes Auto auffahren lassen, um so die Energieübertragung durch die Geschwindigkeit zu messen."

Die Vielfalt der spontanen, ersten Einfälle findet sich bei den am Schluß der Themenfindungsphase vorgetragenen Fragestellungen nicht wieder. Folgende Beschreibungen der geplanten Untersuchungen wurden von den Gruppen vorgetragen:

Gruppe 1: "Wir haben uns überlegt, wenn man zwei Stative nimmt, parallel zueinander aufbaut und dann zwei Kugeln dranhängt, von denen eine in Ruhe ist und die andere fliegt da runter und stößt die an - Es geht um die Übertragung der Kraft auf die andere Kugel, die in Ruhe ist. Und dann wollten wir zwei Kugeln zusammenprallen lassen, also gleichzeitig runterfallen lassen - was für einen Effekt das macht - auch wieder Kraftübertragung." (Hervorhebungen d.Verf.)

Gruppe 2: "Wir wollen mit Wagen so verschiedene Aufprallmöglichkeiten machen. Daß die Wagen von der Seite aufeinanderstoßen und frontal, daß der eine Wagen auch eine Geschwindigkeit hat, wenn der andere auf ihn draufprallt. Wir könnten

auch Kugeln nehmen. (...) Wir wollten eigentlich die Kraft messen, mit der das dann aufprallt. Und dazu haben wir uns überlegt, daß wir das quantitativ irgendwie machen - das könnte man doch ausrechnen, die Kraft. (...) Wir wollen die Übertragung der Kraft messen - wieviel Energie in der Kugel nach dem Zusammenprall dann noch drinsteckt."

Gruppe 3: "Wir wollten zwei Wagen auf der Luftkissenfahrbahn gegeneinanderprallen lassen, und dann wie sich das auf die Geschwindigkeit und die Kraft auswirkt. Das wollten wir dann mit verschiedenen Massen und so machen bei den Wagen - ob das da irgendeinen Zusammenhang gibt, was ja wahrscheinlich ist."

Gruppe 4: "Wir hatten teilweise das gleiche vor wie die Gruppe von Thorsten (Gruppe 3). Und dann hatten wir noch vor, daß wir z.B. einen Gegenstand, also z.B. einen Wagen, mit verschiedenen Geschwindigkeiten und verschiedenen Massen auf z.B. eine Wand prallen zu lassen und dadurch auszumessen, wie die Kraft - das wollen wir mit Federwaagen messen - mit wieviel Kraft der Wagen aufprallt."

Gruppe 5: "Wir haben erstmal den Versuch, daß wir von einer schiefen Ebene eine Kugel runterrollen lassen und auf einen stehenden Wagen von der Luftkissenbahn aufprallen lassen wollen. Und wir sind davon ausgegangen, daß jetzt also die Kraft, die auf den Wagen wirkt durch die Kugel - die berechnet sich ja aus der Beschleunigung und der Masse. Da wir die Schiefe der Ebene vorgegeben haben, ist die Beschleunigung ja immer gleich und die Masse auch. Also muß die Kraft gleichbleiben, egal ob wir die Kugel jetzt von, was weiß ich, 3 Zentimeter hoch auf der schiefen Ebene starten lassen oder von ganz oben. Und trotzdem ist dann, obwohl die Kraft rechnerisch gleich wäre, wird der Wagen in eine verschiedene Geschwindigkeit gestoßen. Das wollen wir untersuchen, wie das damit zusammenhängt."

Gruppe 6: "Wir wollen untersuchen, wie die Kraft durch feste Gegenstände auf bewegliche wirkt. Also ob die Kraft erhalten bleibt, oder ob sie dabei verlorengeht."

Sowohl bei den Spontaneinfällen als auch bei den schließlich gewählten Themenstellungen standen zwei Gruppen von Untersuchungsansätzen im Vordergrund:

1. Kraft-/Energieübertragung und -erhaltung untersuchen (Einfälle c, e, f, i; Gruppenthemen 1, 2, 6)
2. "Aufprallkraft" eines bewegten Körpers bestimmen (Einfälle g, h, i; Gruppenthemen 2, 4)

Dazu kam bei den Spontaneinfällen noch die Idee, plastische Verformungen von Gegenständen bei einem Aufprall zu untersuchen.

Die Themenwahlen beruhten wesentlich auf dem Präkonzept 3-1, nach dem bewegte Körper Kraft haben, die beim Stoß aktualisiert wird und auf andere Körper übertragen werden kann. Man kann diese Kraft an den erzielten Wirkungen messen, also entweder an der Geschwindigkeit, die dem gestoßenen Körper verliehen wird, oder an einer plastischen Verformung.

Die Untersuchung der Übertragung von Kraft/Energie und der dabei auftretenden Verluste gehört zu den beliebtesten Themen in SVUs. Man könnte den Komplex

zu einem themenspezifischen Interesse erklären. Wir haben das nicht getan, sondern ihn lediglich im Rahmen des Interesses an der Dynamik von Bewegungen (Spezifisches Interesse 1) mitangeführt, weil wir vermuten, daß Schüler die Stichworte "Kraftübertragung" und "Energieverluste" aus dem Alltagssprachgebrauch assoziieren, wo sie z.B. im Zusammenhang mit dem Antrieb von Maschinen auftreten. Die Einfälle b) und i) sind im Zusammenhang mit dem Allgemeinen Interesse 3 an praktisch-technischen Fragestellungen zu sehen (Stichwort Knautschzone).

b) Versuchsdurchführung und -auswertung

Das Interesse an den dynamisch-energetischen Aspekten von Stoßvorgängen kam darin zum Ausdruck, daß kaum eine Gruppe sich auf die Angabe von Geschwindigkeiten (genauer gesagt "Schnelligkeiten", denn die Richtungen der Geschwindigkeiten wurden von keiner Gruppe berücksichtigt; vgl. Präkonzept P1) und Massen vor und nach dem Stoß zweier Körper beschränkte. Es wurde versucht, die "Kraft" der bewegten Körper direkt über Federwaagen oder indirekt über die an anderen Körpern erzielten Wirkungen zu quantifizieren. Obwohl von den Anordnungen her einiges an die gängigen Schulversuche zum elastischen Stoß erinnert (Einfälle c, k, l; Themen 1, 3) wäre es daher zu einfach, den Terminus "Kraftübertragung" als "Impulsaustausch" umzuinterpretieren, denn der Impuls ist eine formale Rechengröße, die als "Bewegungsgröße" (Newton) wesensmäßig eher der Kinematik zuzurechnen ist. Außerdem ist zu bedenken, daß Schüler beim Stoßvorgang aktive und passive Körper unterscheiden (Denkraumen 6 "Verursacher-Fixierung/Aktivitätsdenken"). Stoßvorgänge werden verstanden als "Anstoßen" (einem ruhenden Körper Bewegung/Kraft/Energie verleihen) oder als "Zusammenstoßen" (gegenseitige Einwirkung zweier bewegter und daher aktiver Körper). Der Wechselwirkungscharakter von Stoßvorgängen wird oft nicht gesehen, wenn ein Körper vor dem Stoß "ruht" (vgl. Jung 1981a, 75). Bei Gruppe 6 führte das dazu, daß der Bewegung des "stoßenden" Wagens nach dem Aufprall auf einen ruhenden Klotz lange Zeit keine Beachtung geschenkt wurde und die Beobachtung sich auf die erzeugte Bewegung des hinter dem Klotz stehenden zweiten Wagens konzentrierte. Gruppe 1 berücksichtigte für die "Kraftübertragung" beim Stoß einer Pendelkugel mit einer zweiten, freien Kugel die Bewegung der Pendelkugel nach dem Stoß überhaupt nicht. Die festgestellte "unvollständige" Kraftübertragung (bei ungleichen Massen) wurde später folgendermaßen erklärt:

"Wir haben uns diese Ungenauigkeiten dann so erklärt, daß durch Veränderung der Masse auch der Durchmesser kleiner wurde, so daß die ruhende Kugel

nicht mehr in der Mitte getroffen wurde. Das heißt, daß die pendelnde Kugel beim Aufprall auf die ruhende Kugel eine Richtungsänderung verursacht hat, so daß die Energie nicht vollständig in die waagerechte Richtung übertragen werden konnte."

Hinter dieser Betrachtungsweise steht neben dem Aktivitätsdenken der Denkrahmen 7 "Zweckdenken": Der "stoßende" Körper "will" oder "soll" seine Kraft/Energie vollkommen abgeben. Ein Auszug aus dem Bericht von Gruppe 6:

"Wir nahmen an, daß, wenn ein Körper mit Kraft gegen einen festgemachten Gegenstand aufprallt, diese Kraft auf den Widerstand (Holz- oder Eisenklotz, d.Verf.) übertragen und wieder abgegeben wird, weil er sich nicht bewegen kann. Diese Kraft geht demnach auf den 2. Körper über, der dadurch fortbewegt wird."

Deutlich tritt die Vorstellung des aktiven, stoßenden Körpers und des passiven "Widerstands" zutage. Die Kraft des bewegten Körpers überträgt sich durch den Widerstand, der sie selbst nicht übernehmen kann, weil er unbeweglich ist.

Als weitere Vorverständniselemente fungierten der Denkrahmen 8 "Formelfixierung" und die Vorstellung, man könne physikalische Sätze unmittelbar aus genaueren Experimenten ableiten, die aus Denkrahmen 4 resultiert ("Physik liefert eindeutige Ergebnisse"). Die Aufstellung einer Formel beschäftigte die Gruppen 1, 2, 3 und 4. Auch wenn nicht alle Gruppen zum Ziel gelangten, wurde versucht, einen irgendwie gearteten quantitativen Zusammenhang zwischen meßbaren Größen herzustellen. Die Wahl der in Beziehung zu setzenden Größen wurde weniger von der Formulierung des Untersuchungsziels bestimmt als von dem, was bei den gebauten Versuchsanordnungen gerade gemessen werden konnte (Geschwindigkeiten, Auslenkhöhen von Pendelkugeln, Flugweiten beim waagerechten Wurf, Massen, Anzeigen von Kraftmessern usw.). Die Gründe dafür, bestimmte Fragestellungen wieder zu verwerfen, die in den Spontaneinfällen aufgetreten waren, lagen häufig darin, daß keine Aussicht auf genügend genaue Messungen bestand, die es erlaubt hätten, eine quantitative Beziehung abzuleiten.

Der Newtonsche Kraftbegriff spielte bei den Themenfindungen und für die Durchführung der Arbeiten kaum eine Rolle (mit Ausnahme von Gruppe 5, siehe unten). Aus dem vorhergehenden Unterricht, in dem ausführlich über den Trägheitssatz und den Zusammenhang von Kraft und Beschleunigung gesprochen worden war, wurde lediglich der Satz $F = m \cdot a$ aufgegriffen. Einige Gruppen versuchten, mit Hilfe dieser "Formel" die "Kraft" bewegter Körper zu quantifizieren. Der Clusterbegriff 'Kraft' (mit den austauschbaren Namen "Kraft" und "Energie") fungierte in seiner umfassenden Bedeutung als "universelle Wirkungsfähigkeit", die Antrieb aller mechanischen Prozesse ist. Physikalisch lagen die

Verwendungszusammenhänge von "Kraft" näher am Energiebegriff als am Kraftbegriff.

Nur Gruppe 5 hatte eine Fragestellung entwickelt, die sich auf die vorangehenden Unterrichtsinhalte bezog. Die Schüler setzten sich damit auseinander, ob der Satz $F = m \cdot a$ tatsächlich geeignet ist, all das zu quantifizieren, was sie unter Kraft verstanden. Bereits in ihrer eingänglichen Themenformulierung (siehe oben) verweisen die Schüler auf Widersprüche zwischen der nach $F = m \cdot a$ zu berechnenden Kraft, die auf einer schiefen Ebene unabhängig von der zurückgelegten Strecke sei, und der beim Stoß wirkenden Kraft, die von der Geschwindigkeit des stoßenden Körpers und damit von dem auf der schiefen Ebene zurückgelegten Weg abhängig sein müsse. Wir werden diese Gruppe näher verfolgen.

Bevor wir uns einzelnen Arbeitsberichten von Schülergruppen zuwenden, wollen wir aus der Unterrichtsstunde zitieren, die dem SVU unmittelbar vorausging.

- Lehrer (schreibt den Satz $F = m \cdot a$ an die Tafel)
Wie ist das beim freien Fall? Kann das eigentlich stimmen, daß 2 Körper verschiedener Masse gleich beschleunigt werden? - - Ein Körper mit 1kg, einer mit 10kg - wie schnell kommen die unten an?
- S 1 Haben die gleiches Volumen?
- S 2 Ohne oder mit Luftreibung?
- Lehrer Ohne, wir hatten das schon mal diskutiert.
- Ludwig Die kommen gleich an.
- Lehrer Ja, das haben wir gesagt. Aber wie kann man diese Gleichung anwenden beim freien Fall?
- S 3 Das kann nicht gleich sein. Einmal ergibt sich eine zehnmal so hohe Kraft.
- S 4 Dann kommen die nicht gleich an.
- Lorenz Also hatte Aristoteles doch recht.
- Lehrer (schreibt an: $F_1 = 10\text{kg } 9,81\text{m/s}^2$
 $F_2 = 1\text{kg } 9,81\text{m/s}^2$)
- S 5 Ich würde sagen, für den freien Fall gilt die Formel wohl nicht, denn die Kräfte können doch nicht zehnmal unterschiedlich sein.
- Arnim Was für eine Kraft ist das? Die Kraft, die in der Kugel ist, oder die Kraft, die auf die Kugel wirkt?
- Andreas Die Erdanziehungskraft.
- S 3 Die eine ist zehnmal größer als die andere.
- Lehrer Führt das zu unterschiedlichen Bewegungen?
- Markus Die Kräfte sind schon unterschiedlich, z.B. wenn die einem auf den Kopf fallen.
- Ludwig Das 10kg-Ding ist aber doch auch zehnmal so träge, also braucht man

auch zehnmal soviel Kraft.

Schüler (stimmen Lutz zu)

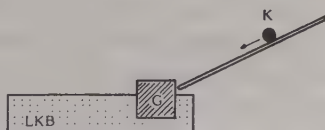
Ludwigs Antwort zeigt, daß er in der Lage ist, den Kraftbegriff in einem newtonschen Sinne zu gebrauchen. Im anschließenden SVU beschäftigte er sich dennoch längere Zeit mit dem Versuch, mit Hilfe der Gleichung $F = m \cdot a$ die "Kraftübertragung" beim Stoß zweier Kugeln zu beschreiben (Gruppe 1). Das ist gemeint, wenn wir sagen, das Newtonsche Konzept werde dem Clusterbegriff 'Kraft' (Präkonzept 3) als weitere Facette zugeordnet. Der Newtonsche Begriff wird erworben (zumindest in wichtigen Teilen), ohne daß deshalb das Cluster notwendigerweise ins Wanken geriete. Davon zeugt auch, daß Schüler 5 die Beziehung $F = m \cdot a$ als eine Formel für Kraft bezeichnet, die nicht in allen Fällen Gültigkeit zu haben braucht. Markus (Gruppe 6) gibt zu erkennen, daß er unter Kraft primär die Wucht oder den Schwung eines bewegten Körpers versteht. Darauf war später auch sein SVU-Thema ausgerichtet ("Kraftübertragung" von einem beweglichen Körper auf einen anderen).

Besonders interessant ist Arnims Frage "Was für eine Kraft ist das? (...)". Bei Arnim deutet sich eine bewußte Differenzierung zwischen verschiedenen Kraftarten an. Im nachfolgenden SVU wendete Arnim sich zusammen mit Ulf (Gruppe 5) genau dieser Frage zu. Das Problem, das Arnim offensichtlich schon im vorhergehenden Unterricht beschäftigt hat, wurde einer vorläufigen Klärung zugeführt. (Dennoch bezeichnete Arnim die Wahl des Themas in der Nachfrage zur Unterrichtseinheit als "zufällig".)

Es folgen drei längere Ausschnitte aus Arbeitsberichten. Die Schüler stellen darin rückblickend ihre Gedankengänge im SVU dar. Sie waren angehalten, nicht nur über das Endergebnis zu berichten, sondern auch über den Ursprung ihres Themas und Zwischenüberlegungen. In die Berichte sind Elemente der SVU-Phasen 4 und 5 (siehe Seite 515) eingegangen. Man sieht an vielen Stellen, daß die Schüler ihre Vorgehensweise kritisch reflektiert haben.

Zunächst zu Gruppe 5 (Arnim und Ulf):

"Wir wollten die Kraft ausrechnen, die auf einen Wagen auf der Luftkissenbahn wirken muß, damit dieser eine bestimmte, meßbare Geschwindigkeit bekommt. Daraufhin hatten wir uns überlegt, daß die "Kraft" der Kugel, die von der schiefen Ebene herunterrollt $F = m \cdot a$ ist. Wenn wir die Kraft ausrechnen und die Geschwindigkeit messen, dann könnten wir beides in Beziehung zueinander setzen.



K: Stahlkugel
LKB: Luftkissenfahrbahn
G: Gleiter

Dies war natürlich völliger Unsinn, denn das F in der Formel gilt für die auf die Kugel wirkende Kraft, nicht für die, die die Kugel ausübt. Wir fragten uns dann, ob die Formel nicht trotzdem auch für die auswirkende Kraft der Kugel gilt. Aber dies führten wir auf zweierlei Weise zum Widerspruch: 1. durch Überlegung. Weil die Masse der Kugel immer gleich ist und die Beschleunigung auf der schiefen Ebene auch immer gleich ist, mußte auch die Kraft, die die Kugel ausüben kann, immer gleich sein. Es wäre also egal, von welcher Höhe wir die Kugel rollen lassen, der Wagen würde immer die gleiche Geschwindigkeit bekommen, weil die einwirkende Kraft immer gleich ist. Dies erschien uns aus rein logischen Gründen absurd. 2. durch den Versuch. Dies wurde durch die Versuche bestätigt. Aus verschiedener Höhe bekam der Wagen verschiedene Geschwindigkeiten.

Wir wollten dann noch die Kräfte miteinander in Beziehung setzen und brauchten dafür die Korrelation der Beschleunigungen. Aber da der Wagen von 0 auf 100 in keiner Zeit kommt (erst steht er, dann fährt er mit konstanter Geschwindigkeit) konnten wir auch keine Beschleunigung auf der Luftkissenbahn feststellen."

Der Gedankengang ist in sich schlüssig dargestellt. Arnim und Ulf haben am Schluß erkannt, daß "wirkende" Kräfte aus Beschleunigungen ermittelt werden. Die von der Kugel auf den Gleiter ausgeübte Kraft könnte man aus der Beschleunigung des Gleiters ermitteln, die aber meßtechnisch nicht zu erfassen ist. Die Schüler haben ferner erkannt, daß die "Kraft, die die Kugel ausüben (kann)" (gemeint ist eine Kraftstoßfähigkeit, die im Schwung des bewegten Körpers besteht) und die Kraft, "die auf die Kugel wirkt" (Hangabtriebskraft) unterschiedliche Dinge sind und $F = m \cdot a$ nur für den letztere Fall gilt. Auf das Aktivitätsdenken (Denkrahen 6) ist die verbliebene Vorstellung zurückzuführen, daß "die Kraft, die die Kugel ausüben kann", allein von ihr bestimmt werde.

Wie sich bereits in den Themenvorstellungen andeutete, sprachen die Schüler während des SVU ganz überwiegend von "Kraft" in Zusammenhängen wie "Kraft der Kugel", "Kraft, mit der der Wagen aufprallt" oder "übertragene Kraft". In den später abgegebenen Berichten findet man diese Ausdrucksweise seltener. Die in Richtung auf eine Differenzierung des Clusterkonzepts veränderten Vorverständnisse führten zu Reformulierungen der ursprünglichen Beschreibungen getrennt nach "Kraft" und "Energie".

Mehrfach wurde versucht, die eben genannten "Kräfte" mit Hilfe der Gleichung $F = m \cdot a$ zu bestimmen. Die Gleichung war dem Cluster der im Präkonzept 3 koexistierenden Kraftvorstellungen aufgepropft. Das Problem, bei den überwiegend gleichförmigen Bewegungen Beschleunigungen zu ermitteln, versuchten einige Schüler zu lösen, indem sie aus Weg- und Zeitwerten $a = (s/t)/t$ berechneten. Über eine ähnliche Vorgehensweise berichtet Trowbridge (1981; siehe Punkt C.2.4). Die Formelfixierung (Denkrahen 8) zeigte sich an diesem Beispiel besonders deutlich.

Das Thema von Markus und Andreas (Gruppe 6) lautete: "Wie wirkt die Kraft durch einen festen Gegenstand auf einen beweglichen?".

"Um zu untersuchen, wo welche Kraft hinging, sollte erstens die Kraft des Wagens 1 beim Aufprall und zweitens die Kraft des zweiten Wagens nach dem Abstoß durch $F = m \cdot a$ und a durch $\Delta s / \Delta t / \Delta t$ berechnet werden. (...) Bevor wir wußten, woher t zu nehmen war, stellte sich unser erster Irrtum heraus. Wir konnten die Kräfte der Wagen nicht nach $F = m \cdot a$ berechnen, weil die Wagen gar nicht beschleunigten, sondern eine gleichförmige Geschwindigkeit hatten.



W1, W2: Experimentierwagen
Kl: Holz-, Alu-, Stahlklotz

Wir stellten die Frage, ob Kraft anders berechnet werden konnte oder ob das, was die Wagen hatten, überhaupt Kraft war, zurück und versuchten durch die Geschwindigkeit irgendwelche Rückschlüsse zu ziehen. (...)

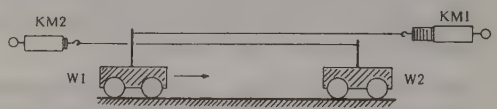
Auswertung: Beschleunigung entsteht, wenn Kraft dauernd wirkt. Es ist also Kraft vorhanden. Bei gleichförmiger Bewegung wirkt die Kraft nur einmal - als Auslöser. Danach ist Kraft nicht mehr vorhanden. Trotzdem muß ein gleichförmig bewegter Körper eine Energie, die z.B. beim Aufprall erkennbar ist, besitzen. Sie muß proportional zur Masse und Geschwindigkeit sein. Wir haben sie Bewegungsenergie genannt.

Markus und Andreas unterscheiden am Schluß ihrer Überlegungen zwischen der Kraft, die zur Beschleunigung eines Körpers führt und der Energie, die der bewegte Körper besitzt. Ebenso wie bei Arnim und Ulf ist der Clusterbegriff 'Kraft' während der SVU-Phase ins Wanken gekommen, weil die Schüler die Gelegenheit hatten, über einen längeren Zeitraum hinweg eigene Überlegungen anzustellen und dabei ihren Kraftbegriff an einem selbstgewählten Problem abzuarbeiten. Dabei traten Widersprüche zum physikalischen Kraftbegriff zutage, die sich daran entzündeten, daß der Satz $F = m \cdot a$ sich zur Quantifizierung dessen, was sie unter 'Kraft' verstanden, als ungeeignet erwies. Die Auseinandersetzung mit dem Kraftbegriff im SVU hatte deshalb eine besondere Qualität, weil die Schüler selbst auf Widersprüche stießen. Dem vorhergehenden Unterricht war es nicht gelungen, grundlegende Unterschiede zwischen dem Alltags-Clusterbegriff 'Kraft' und dem Newtonschen Konzept aufzuzeigen. Die Schüler hatten das Newtonsche Konzept einfach in das Cluster integriert. Zumindest einige Schüler wurden durch den SVU für die Notwendigkeit einer begrifflichen Unterscheidung zwischen dem, was Körper aufgrund ihrer Bewegung "besitzen", und den äußeren Einflüssen, die die Bewegung verursacht haben, sensibilisiert. Der Newtonsche Kraftbegriff und auch der Begriff der kinetischen Energie gerieten damit zwar nur in Umrissen ins Blickfeld, aber der nachfolgende Unterricht,

in dem es um die Ausschärfung dieser Begriffe ging, fiel auf fruchtbaren geistigen Boden.

Wenden wir uns einer weiteren Schülergruppe zu. Gruppe 4 verfolgte bei ihren Experimenten einen pragmatischen Ansatz: Kraft ist das, was der Kraftmesser mißt. Dazu kam die Vorstellung der Umwandlung von Kraft, die beim In-Bewegung-Setzen auftritt, in Energie, die der bewegte Körper speichert, und umgekehrt von gespeicherter Energie in ausgeübte Kraft. Diese Vorstellung erwächst dem Präkonzept 3, nach dem Kraft, Energie, Wucht, Schwung, usw. nur verschiedene Erscheinungsformen von etwas prinzipiell Gleichem sind.

"Ein Wagen wird mit verschiedenen Kräften (2 bis 5N) auf ein 21cm entferntes Fahrzeug abgeschossen. Durch die Konstruktion bedingt kann damit später die Kraft abgelesen werden, die auf das ruhende Fahrzeug ausgeübt wurde. (...)



W1, W2: Experimentierwagen

KM1: Kraftmesser zum "Abschuß" von Wagen 1

KM2: Kraftmesser zur Messung der "Aufprallkraft"

Die Auswertung der Versuche zeigt, daß die abgeschossenen Wagen einen großen Teil ihrer Energie vor dem Aufprall abgeben. Der größte Teil dieser Verluste ist auf die Reibung zurückzuführen. Außerdem zeigen die Versuche, daß die Aufprallkraft nicht proportional mit der Abschußkraft steigt."

Als "Abschußkraft" wird das bezeichnet, was der gespannte Kraftmesser 1 anzeigt. Analog mißt Kraftmesser 2 die "Aufprallkraft". Für beide Fälle wäre physikalisch "Spannenergie" zu setzen. "Kraft" und "Energie" sind bei Gruppe 4 zwei Namen für eine extensive Größe - für ein bestimmtes Vermögen, Wirkungen zu erzielen. Die Schwierigkeit des Newtonschen Kraftkonzepts liegt zu einem gewichtigen Teil darin begründet, daß es sich um intensive Größe mit funktionalem Verlauf handelt, deren Wert jeweils nur für Zeitpunkte angegeben werden kann. Bei Schülern fungiert jedoch eher eine globale Betrachtungsweise von Vorgängen (Denkrahen 10), bei der eine mengenmäßige Bilanzierung der auftretenden Größen angestrebt wird. Die Schüler aus Gruppe 4 berücksichtigten für ihre Überlegungen übrigens nicht, daß bei sonst gleicher Versuchsanordnung die Verwendung unterschiedlicher Federwaagen für den Kraftmesser 2 (mit unterschiedlichen Federkonstanten) zur Anzeige unterschiedlicher Beträge der "Aufprallkraft" führte. Da die "Aufprallkraft" als mengenartige Größe verstanden wurde, die unabhängig von der Bauart des "Kraft"-Messers gleich angezeigt werden mußte, wurden die Unterschiede auf meßtechnische Schwierigkeiten zurückgeführt.

Phase 4: Diskussion und Konsensbildung

Alle Gruppen hatten sich im Rahmenthema "Stoßvorgänge" mit Fragestellungen auseinandergesetzt, die sich um den Begriff 'Kraft' (im Sinne des Präkonzepts 3 und seiner spezifischen Ausprägung P3-1) herumgruppierten. In der vierten Phase des SVU trugen die Gruppen zunächst ihre Untersuchungsansätze und Ergebnisse vor. Der Lehrer sammelte die Aussagen stichwortartig an der Tafel, wobei er sich bemühte, die Wortwahl der Schüler beizubehalten. Hier setzt unser Wortprotokollauschnitt ein:

Lehrer An der Tafel steht ganz oft das Wort Kraft. ("Aufprallkraft", "auswirkende Kraft", "Abschußkraft", "Kraft des Wagens", "ausgeübte Kraft", "Kraft wird übertragen") Ist da immer dasselbe damit gemeint, wenn da "Kraft" steht?

Ludwig Jetzt wird es schwer.

Markus (Gr. 6) Das bei uns - was wir bei der gleichförmigen Bewegung hatten, würde ich nicht als Kraft bezeichnen, weil - bei Beschleunigung wirkt die Kraft ja andauernd. Deswegen ist sie wahrscheinlich auch anwesend. Bei gleichmäßiger Geschwindigkeit wirkt die Kraft ja nur einmal als Auslöser der Geschwindigkeit und kann dann so auch nicht mehr drin sein. Ich würde dann den rollenden Wagen bei uns - was der in sich hat - als Bewegungsenergie bezeichnen.

Arnim (Gr. 5) Ich würde zum Beispiel - zu der Kraft, die ausgeübt wird, und die Kraft, die der Wagen hat - ich würde sagen, der Wagen hat irgendeine Kraft und nachher kann er die abgeben oder so. Und bei anderen Fällen ist das wieder die Kraft, die ausgeübt wird. Da ist ein Unterschied.

Claus (Gr. 3) Ich würde sagen, daß der Wagen, wenn er da angesaut kommt, Bewegungsenergie hat. Ich nenne das dann immer Energie. Dann wird die Bewegungsenergie erstmal in Verformungsenergie übertragen, wenn man das so sagen kann, in die Feder (Impulsfeder eines Experimentierwagens, d.Verf.). Die überträgt das dann wieder in die andere Feder und das wird dann wieder zu Bewegungsenergie - also, daß die Energie immer wieder umgeformt wird.

Die Schüler schlagen eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Kraftarten (Arnim) oder sogar zwischen Kraft und Energie (Markus, Claus) vor. Der Clusterbegriff wird aufgeschlüsselt. Die Diskussion hat einen Stand erreicht, der Ähnlichkeiten zur Situation der Physik in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts aufweist (siehe dazu Kapitel D, besonders Punkt D.4.2). Es bot sich daher an, einen Auszug aus einem Helmholtz-Text aus dem Jahre 1861 einzusetzen, in dem eine begriffliche Trennung zwischen der "Intensität der Kraft" (Kraft) und der "Gesamtmenge der Antriebskraft" (Energie) vorgeschlagen wird. Die Phase der Sammlung und Diskussion der Schülerergebnisse ging in die SVU-Phase 5 über, in der der Standpunkt der Wissenschaft Physik eingebracht wird.

Phase 5: Vergleich mit dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand

Den Schülern wurde der folgende Text vorgelegt:

"Hermann Helmholtz: Über die Anwendung des Gesetzes der Erhaltung der Kraft auf die organische Natur

Der bedeutendste Fortschritt in den Naturwissenschaften, durch welchen sich unser Jahrhundert auszeichnet, bestand in der Entdeckung eines allgemeinen Gesetzes, das all die verschiedenen Zweige der Physik und der Chemie umfaßt und beherrscht. Heute nennt man das Gesetz allgemein "das Prinzip der Erhaltung der Kraft". Eine bessere Bezeichnung wäre aber vielleicht diejenige von Mr. Rankine, "die Erhaltung der Energie", weil sich das Gesetz nicht auf das bezieht, was wir gewöhnlich die Intensität der Kraft nennen: es bedeutet nicht, daß die Intensität der Naturkräfte konstant ist, sondern es bezieht sich vielmehr auf die Gesamtmenge der Antriebskraft, die durch irgendein natürliches Verfahren gewonnen und mit welcher eine gewisse Menge von Arbeit verrichtet werden kann. Das Gesetz der Erhaltung der Kraft besagt, daß jede Naturkraft, die irgendeine Veränderung hervorruft, dabei immer ihre Fähigkeit erschöpft und verliert, dieselbe Veränderung ein zweites Mal hervorzurufen. Während aber bei jeder Veränderung in der Natur die Kraft, welche die Ursache dieser Veränderung war, erschöpft wird, gibt es immer eine andere Kraft, die im gleichen Maße das Vermögen gewinnt, neue Veränderungen in der Natur herbeizuführen, wie es die erste Kraft verloren hat. Es gibt aber noch eine andere Art mechanischer Triebkraft, nämlich die Geschwindigkeit. Wenn die Geschwindigkeit eines Körpers eine Arbeitsleistung erzeugt, nennen wir sie vis viva oder lebendige Kraft eines Körpers. Die große Kraft einer Geschosßkugel hängt lediglich von ihrer Geschwindigkeit ab."

(Helmholtz nach Samburski 1978, 518ff; stark gekürzt)

Historische Texte werden in einem SVU dann eingesetzt, wenn Schüler Argumentationslinien verfolgen, die Parallelen zu Entwicklungsstufen der physikalischen Theoriebildung aufweisen. Der Einsatz erfolgt unter drei Gesichtspunkten:

1. Die Texte regen Schüler an, ihre eigenen Überlegungen mit physikalischen Theorieansätzen zu vergleichen und daran zu explizieren.
2. Geeignete Texte zeigen Schülern, daß Physik nicht nur aus einem Kompendium von eindeutigen Fakten und Formeln besteht, sondern daß es gegensätzliche Standpunkte zu einem Problem geben kann, die kontrovers diskutierbar sind.
3. Die Erfahrung, daß physikalische Theorien, die über lange Zeit Bestand hatten und von anerkannten Physikern vertreten wurden, heute durch andere ersetzt sind, vermittelt, daß Physik eine dynamische-fortschreitende Disziplin ist und auch der heutige Erkenntnisstand nicht unumstößlich ist.

Der Einsatz historischer Texte soll also auch dazu beitragen, das oft als "naiv-empiristisch" zu bezeichnende Bild von der physikalischen Erkenntnisgewinnung zu korrigieren (vgl. Denkraum 4 "Physik liefert eindeutige Ergebnisse").

Zitieren wir abschließend aus der Diskussion des Helmholtz-Textes:

Lehrer Was könnt ihr aus diesem Text für eure Versuche für Schlußfolgerungen ziehen? Oder haben die beiden Sachen gar nichts miteinander zu tun?

Lorenz (Gr. 1) Also bei unserem Versuch mit dem Pendel - wenn man da die erste Kugel gegen die zweite prallen läßt und die dann nochmal gegen eine andere, dann würde das für unseren Versuch bedeuten, daß die Kraft - dieser Helmholtz sagt das so - daß die immer gleich übertragen wird. Ich finde die Begrifflichkeit, die schwankt da ein bißchen. Der legt sich nicht genau fest.

Lehrer Was meinst du damit, er legt sich nicht genau fest?

Lorenz Er redet einmal von Kraft, die übertragen wird - wie ich eben sagte - von Kugel zu Kugel, und einmal redet er von Kraft, die einwirkt. Das kriege ich irgendwie nicht so ganz in den Kopf. Dieser andere Typ da, der redet auf einmal wieder von Energie, dieser Rankine. Der redet von Energie statt von Kraft, da unterscheidet der sich von ihm. Deshalb ist das keine einheitliche Festlegung der Begriffe.

Das Thema, das Lorenz mit seiner Gruppe bearbeitet hatte, lautete: "Die Übertragung der Kraft beim Zusammenstoß von Kugeln". Lorenz erkennt, daß Helmholtz entgegen seinem eigenen Vorschlag, zwischen Kraft und Energie zu unterscheiden, von der Erhaltung der "Kraft" spricht, wo eigentlich Energie gemeint ist. Auch Ulf kritisiert diese Inkonsistenz:

Lehrer Der Helmholtz schlägt ja vor, besser von der Erhaltung der Energie zu sprechen als vom Prinzip der Erhaltung der Kraft. Hält Helmholtz sich denn an seinen eigenen Vorschlag?

Ulf (Gr. 5) Nein, tut er nicht. Er nennt es trotzdem Kraft. Z.B. im letzten Satz: "Die große Kraft einer Geschosßkugel hängt lediglich von ihrer Geschwindigkeit ab". Ich würde sagen, daß das gerade die Energie ist, die die Kugel hat, wenn sie jetzt abgeschossen wird.

Weitere Anzeichen dafür, daß die Schüler begannen, eine Differenzierung zwischen Kraft und Energie nicht nur verbal durchzuhalten, sondern auch inhaltlich zu begründen, waren in den Arbeitsberichten zu finden, die etwa 2 Wochen später abgegeben wurden und aus denen wir oben zitiert haben.

Die 6. Phase des SVU, in der methodische Aspekte der Gruppenarbeiten reflektiert und mit wissenschaftlichen Arbeitsweisen verglichen werden sollen, wurde nicht durchgeführt.

E.4 Fallstudie 3: Wechselwirkungskräfte

Die dritte Fallstudie hat drei Schulstunden aus einem zweiten Leistungskurs Mechanik zum Gegenstand, in denen es um Wechselwirkungskräfte geht. In den vorhergehenden Wochen waren im Anschluß an die Kinematik folgende Themen behandelt worden:

- eindimensionaler, unelastischer Stoß; Impulsbegriff, Impulserhaltungssatz (4 Schulstunden)
- Beispiele und Rechnungen zur Impulserhaltung, z.B. Rückstoß beim Gewehr-schuß (3)
- Diskussion über die Frage "Was ist die Ursache von Bewegungsänderungen?", qualitative Einführung des Kraftbegriffs (2)
- Klausur: Aufgaben zum Wurf und zur Impulserhaltung (3)
- Fahrbahnversuche zum Zusammenhang von Kraft und Beschleunigung, Einführung von $F = m \cdot a$ (4)
- Diskussion über die Frage, welche Festlegung für Kraft sinnvoller sei: $F = m \cdot v$ oder $F = m \cdot a$? Aufhänger war die Schüleridee, das es einen Unterschied mache, ob jemandem ein Stein aus großer Höhe oder aus geringer Höhe auf den Kopf falle, also müsse die Kraft von der Geschwindigkeit abhängen (2)
- Zusammenhang von Kraft und Impuls: $\Delta p = F \cdot \Delta t$, Rechnungen mit diesem Satz (2)
- Kräfte beim elastischen Stoß zweier Experimentierwagen (1)

Die letzte Unterrichtsstunde haben wir in Teilen bei der Diskussion des Denkrahmens 10 "Globales Denken/ Ursprungseinbeziehung" herangezogen (siehe Seite 217ff.). Der Lehrer hatte die Frage gestellt, was man über die Kräfte aussagen könne, die während des elastischen Stoßes aufträten. Die Schüler waren in ihren Ausführungen weniger auf den Aspekt der lokalen Wechselwirkung der beiden Experimentierwagen eingegangen als auf die Frage einer "Kraftübertragung" vom bewegten Wagen auf den vor dem Stoß ruhenden Wagen.

Der erste Teil von Fallstudie 3 schließt hier unmittelbar an. Der Lehrer gibt zu Beginn der Stunde eine kurze Zusammenfassung dessen, was am Vortage gesagt worden war, und wiederholt dann seine Frage:

Lehrer Beide Wagen üben jeweils auf den anderen Wagen irgendwelche Kräfte aus. Was kann man über diese beiden Kräfte sagen?

S 1 Haben sie jetzt gleiche Geschwindigkeiten oder haben sie unterschiedliche Geschwindigkeiten?

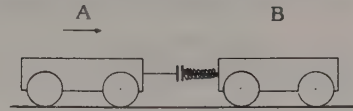
Lehrer Ganz egal, wir können für den Anfang mal annehmen, daß der eine Wagen in Ruhe war und der andere dagegenfährt.

S 2 Also wie sie sich danach verhalten?

Lehrer Nein, nicht wie sie sich danach verhalten, sondern während dieses Zusammenstoßes. Das dauert ja eine gewisse Zeit.

Sven A hat ja viel Kraft, während B keine Kraft hat. Das gleicht sich dann irgendwie aus.

Lehrer Aber wenn wir nun mal nicht den Impuls betrachten, sondern die Kräfte - Der linke Wagen kommt also von hier an ... (zeichnet die nebenstehende Skizze)



Sven Die Kraft, die auf den Wagen wirkt, wird in dem Moment, in dem sie aufeinanderprallen, reduziert.

Der Lehrer hat die Formulierungen, die Sven zum "Ausgleich der Kräfte" verwendete, so uminterpretiert, als habe dieser vom Impuls gesprochen. Das würde die Beschreibung physikalisch richtig klingen lassen: Die Einzelimpulse gehen im Gesamtimpuls nach dem Stoß auf. Es ist naheliegend, daß die Schüler das zur Diskussion gestellte Phänomen zunächst in einen Zusammenhang mit Impuls und Impulserhaltung bringen, denn an einem äußerlich Phänomen hatten sie diese Begriffe kennengelernt (allerdings am unelastischen Stoß). Vermutlich ist für Sven die Unterscheidung zwischen den physikalischen Konzepten Impuls und Kraft noch gar nicht zu einem Problem geworden und ihre Gehalte sind bei ihm unter dem Clusterbegriff 'Kraft' (Präkonzept 3) subsumiert. Auch wenn man davon ausgeht, daß Sven eigentlich "Impuls" meinte, als er von "Kraft" sprach, bleibt zu fragen, ob er getrennt vom Impulsbegriff, der als Quasi-Eigenschaft (bei festem Bezugssystem) dem Schülervorverständnis näher liegt (vgl. Denkrahmen 5 "Eigenschaftsdenken"), das Phänomen mit dem Newtonschen Kraftkonzept erfassen kann, über das ausführlich gesprochen worden war. Der Lehrer kommt auf diese Frage zurück.

Lehrer Ich möchte zu dem, was Sven eben gesagt hat, noch eine Frage stellen: Sven benutzt immer diesen Ausdruck "ein Wagen hat Kraft, der andere Wagen hat keine Kraft", also der da stillsteht. Ist denn Kraft eine Größe, die in der Bewegung drinsteckt? Wie sieht das mit der Kraftübertragung auf der Gegenseite aus?

Frank Die Kraftübertragung wird in Bewegungsenergie - wird auf den anderen Wagen übertragen, wenn der erste Wagen auf den zweiten eine Kraft ausübt, über die Feder.

Lehrer Der erste Wagen, der hier gegenfährt, übt offensichtlich zu dem Zeitpunkt, wo der Stoß hier abläuft, eine Kraft auf den anderen aus. (schreibt das an die Tafel)

S 4 Also, wenn der Wagen B stillsteht, dann übt er ja an und für sich auch eine Kraft aus. Und zwar während des Zusammenpralls.

Lehrer Worauf übt er eine Kraft aus?

S 4 Ja, er hält gegen den anderen Wagen - der Druck praktisch. Wenn der keine Kraft ausüben würde, dann würde sich die Feder ja praktisch gar nicht zusammendrücken. Dann würde der Stillstand sofort wegfallen, ohne daß die Feder zusammengedrückt würde.

Lehrer Das ist eine ganz wichtige Feststellung. (schreibt an die Tafel: "Zu jedem Zeitpunkt, während die Berührung der beiden Wagen stattfindet, übt A auf B eine Kraft aus und ebenso B auf A")

Wenn man genau nachliest, hat Schüler 4 nicht davon gesprochen, daß Wagen B eine Kraft auf Wagen A ausübt, sondern daß er dagegenhält. Die Kraftwirkung wird eher an der Verformung der zwischengeschalteten Impulsfeder festgemacht als an der Beschleunigung von Wagen A. Diese Anklänge an den statischen Kraftbegriff zeigen sich auch bei den Aussagen des Schülers (siehe unten). Eigentlich spricht nur der Lehrer explizit davon, daß Wagen B eine Kraft auf Wagen A ausübt. Schüler 4 übernimmt im weiteren Verlauf des Unterrichtsgesprächs diese Ausdrucksweise. Seine anfängliche Zurückhaltung beruht auf dem Präkonzept 4, nach dem nur belebte oder bewegte Körper aktiv Kräfte ausüben können. Ruhende Körper, wie der Wagen B, leisten Widerstand, sie wehren sich gegen angreifende Kräfte. Wagen B fährt nach Ansicht von Schüler 4 nicht sofort los, sondern "er hält noch einen Augenblick dagegen" (siehe unten). Eine beschleunigende Wirkung dieses passiven Widerstands auf den "aktiv" agierenden Körper (Wagen A) wird oft nicht gesehen. Der Lehrer nimmt die Äußerungen des Schülers jedoch so wahr, als argumentiere dieser voll im Sinne des Newtonschen Kraftkonzepts.

Lehrer In welcher Richtung kann A auf B nur eine Kraft ausüben?

S 5 Nach rechts. (siehe Zeichnung)

Lehrer (zeichnet Kraftpfeil ein und gibt weitere Erläuterungen dazu)

S 4 Also, ich meine, der Wagen B übt auch eine Kraft aus, und zwar in dem Moment, wo sie zusammenstoßen.

Lehrer Wie reagiert A denn auf den Zusammenstoß, wenn er mit irgendeiner Geschwindigkeit auf B prallt?

S 4 Also, die Feder drückt sich zusammen. Dann stehen beide Wagen für einen Augenblick still - theoretisch meine ich. Auf jeden Fall hält der Wagen B noch einen Augenblick dagegen, in dem Moment, wo sich die Feder zusammendrückt. Und dann fährt der Wagen B erst los.

Lehrer Und wie können wir das hier so kräftemäßig festhalten? Was tritt also noch für eine Kraft auf?

S 4 Also, die Kraft, die B auf A ausübt - (wird vom Lehrer unterbrochen)

Lehrer B übt eine Kraft auf A aus, und zwar in welcher Richtung?

S 4 Entgegengesetzt zu A.

Lehrer Also eine Kraft, die den Wagen nach links treibt. (zeichnet entsprechenden Kraftpfeil ein)

Es folgt jetzt eine Passage, in der Kai sich implizit gegen die Annahme wehrt, der ruhende Wagen B könne selbst eine Kraft ausüben. Kai greift diese Annahme indirekt dadurch an, daß er behauptet, wenn B überhaupt eine Kraft ausübe,

dann müsse dies nach beiden Richtungen erfolgen. Seine Einwände sind darauf zurückzuführen, daß er bei 'Kraft' an eine Eigenschaft von Körpern denkt (vgl. Denkrahen 5): Wagen B kann nur dann eine Kraft auf A ausüben, wenn B eine Kraft hat, und die müßte potentiell in alle Richtungen wirken. Wie aber soll ein ruhender, belebter Körper Kraft haben?

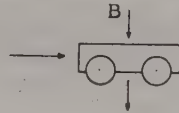
Kai Ja, aber eigentlich stimmt das doch gar nicht. B übt ja auf die andere Richtung auch eine Kraft aus. Wenn der Wagen A von der anderen Seite kommen würde, würde es ja nach dahin auch eine Kraft geben.

Lehrer Was gibt es zu der Bemerkung von Kai zu sagen?

Schüler (schweigen)

Lehrer Kannst du das nochmal wiederholen?

Kai Also nochmal: Bei B wird nach beiden Seiten eine Kraft ausgeübt. Wenn der Wagen A von rechts kommen würde, wird die Kraft, die jetzt von B kommt, auch auf A ausgeübt werden. Die Kraft kommt von der Erdanziehung. Die Erdanziehung hält B fest wie ein Magnet. (geht zur Tafel und zeichnet) Diese Kraft wirkt A entgegen.



Nach Kais Meinung wird die Kraft, die Wagen A entgegenwirkt, nicht von Wagen B verursacht, sondern sie kommt durch die Erdanziehung zustande. Hier liegt ein besonders klares Beispiel für das Fungieren von Präkonzept 5 vor. Gewicht, bzw. Erdanziehungskraft, Reibung und Trägheit sind in der Vorstellung von Kai verkoppelt. Charakteristischerweise meint Kai, in einem schwerelosen Zustand ließe sich der Wagen in Bewegung setzen, ohne daß die Impulsfeder verformt würde.

Lehrer Die Erde übt also auf jeden Körper eine Kraft aus, die Gewichtskraft, und die drückt den Wagen auf die Schiene. Hat das jetzt irgendeine Auswirkung auf unseren Versuch für die Bewegung in diesen beiden Richtungen?

Kai Eigentlich schon. Wenn der Wagen da nur so stehen würde und keine Kraft ihn festhalten würde, und der andere Wagen würde ankommen, dann würde der den sofort wegstoßen, ohne daß sich die Feder nur ein ganz bißchen bewegt hat.

Lehrer Wenn die Erdanziehung nicht da wäre?

Kai Ja.

Peter widerspricht daraufhin Kai und meint, die Feder werde auf jeden Fall eingedellt, da jeder Körper ein gewisses "Trägheitsmoment" besitze. Eine Reihe weiterer Schüleräußerungen dazu liegen nur unvollständig vor, da die Qualität der Tonaufzeichnung eine wörtliche Transkribierung an dieser Stelle nicht zuließ. Wir fahren an einer Stelle fort, an der Kai seine Vorstellung veranschaulicht.

Kai Also, ich stelle mir das bei dem Wagen so vor: Wenn man jetzt unten am Wagen so ein Gummiband dran hat, das nach unten zieht, und jetzt stößt was anderes dagegen. Das Gummiband wird immer länger, und das reißt irgendwann, weil die andere Kraft eben groß genug ist, und dann kann das losfahren. So stelle ich mir das bei dem Wagen ungefähr vor.

Peter Ich würde sagen, die Deformation der Feder, d.h. daß die Feder gespannt wird, verleiht dem Wagen die Geschwindigkeit. Also, wenn sich die Feder wieder entspannt, wird der Wagen beschleunigt. Und wenn die Feder nicht deformiert wird, dann kann der Wagen nicht beschleunigen.

Frank Der Kräftepfeil würde immer senkrecht bleiben und sich nicht seitlich verschieben.

Lehrer Ich weiß noch nicht, welche Rolle spielt nun in diesem tatsächlichen Versuch das Gummiband? Da ist ja gar keins.

Kai Das ist nur symbolisch gedacht - für die Kraft, die von unten wirkt. Damit man sich das vorstellen kann.

Lehrer Aber darauf hat Frank jetzt eine bestimmte Antwort gegeben. Die Kraft wirkt immer senkrecht nach unten, auch wenn sich der Wagen ein Stück verschoben hat. Und ein Gummiband ist unten an der Schiene fest. Wenn der Wagen jetzt aus seiner Ruhelage rauskommt, dann hängt das Gummiband ganz schräg und zieht zurück. Aber die Erdanziehungskraft kann nicht zurückziehen.

Kai Ach ja, das stimmt.

Die Ausführungen Kais lassen sich plausibel auf das Fungieren des Präkonzepts 5 zurückführen. Kai akzeptiert zwar, daß sein Vergleich mit dem Gummiband nicht ganz trägt (wie das bei Vergleichen meistens so ist). Die Trägheit-Gewicht-Reibung-Kopplung selbst ist dadurch aber wohl nicht ins Wanken geraten.

Der Lehrer ruft in Erinnerung, was er als wesentliches Merkmal des Newtonschen Kraftbegriffs im Unterricht ausgeführt hatte.

Lehrer Wie ist das mit dem Kraftbegriff, den wir jetzt haben. Wir hatten gesagt, wenn die Kraft auf einen Körper einwirkt, dann wird sie diesem eine Beschleunigung erteilen.

S 6 Also, die Kraft von A und B zusammengerechnet, ist ein Ganzes.

Lehrer Was heißt das?

S 6 Ich meine, A hat $\frac{2}{3}$ dieser Kraft und B hat $\frac{1}{3}$ dieser Kraft, und zwar entgegengesetzt. Dann wird praktisch $\frac{1}{3}$ von der Kraft, die Wagen A hat, aufgehoben.

Lehrer Wie kommst du auf diese Aufteilung?

S 6 Ich würde sagen, das kann man sich dann irgendwo besser vorstellen.

Lehrer Das ist dann also ganz willkürlich?

S 6 Alle Kräfte, die dort herrschen, werden zusammengezählt und dann aufgeteilt.

Schüler 6 behandelt Kräfte als Eigenschaften von Körpern (vgl. Denkraumen 5)

und als extensive Größe, ähnlich wie die elektrische Ladung. Mengenartige Größen sind anschaulicher ("besser vorstellbar") als intensive Größen wie die Newtonsche Kraft, weil man sie bilanzieren kann ("Alle Kräfte, die herrschen, werden zusammengezählt und dann aufgeteilt"), was dem globalen Denken entgegenkommt (Denkrahen 10).

Auch bei Kai fungiert weiterhin das Eigenschaftsdenken. Für ihn ergibt sich die Bewegung des Wagens B nach dem Stoß aus einem "Kräftewettkampf" zwischen der Kraft des Wagens A und der Widerstandsfähigkeit von Wagen B.

Lehrer In welchen Größenverhältnissen stehen die Kräfte zueinander?

Kai Wenn jetzt der Wagen A den Wagen B nach dem Stoß dann weiter schiebt, muß die Kraft von A auf alle Fälle größer sein. Denn wenn die Kraft von B größer sein würde, dann würde die Kraft von A ja gar nichts mehr ausrichten können. Dann würden die Wagen ja stehenbleiben.

S 7 So eine Kraftaufteilung ist abhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs und der Masse - muß ja so sein, anders geht es ja gar nicht.

Lehrer Was heißt Kraftaufteilung?

S 7 (Antwort akustisch nicht zu verstehen)

Lehrer Ihr seht immer nur eine Kraft, die ihr dann aufteilen wollt. Wir haben ja zwei Kräfte, und die greifen dann ja auch an zwei ganz verschiedenen Körpern an.

Die Aussage von Schüler 7 ist im Zusammenhang mit Präkonzept 3-1 zu sehen: Bewegte Körper haben Kraft, die von Masse und Tempo abhängt. Das Grundproblem besteht darin, daß die Schüler nicht davon abgehen, die Kraft als Eigenschaft zu behandeln. Daraus ergibt sich die Nähe ihrer Ausführungen zum Prinzip der Impulserhaltung. Für eine Betrachtung des elastischen Stoßes im Rahmen des Newtonschen Kraftkonzepts ist es dagegen notwendig, die Größe Kraft dem Prozeß der Wechselwirkung zuzuordnen, nicht den beteiligten Körpern.

Der Lehrer geht vom Beispiel des elastischen Stoßes der beiden Experimentierwagen ab, nachdem in weiteren Schüleräußerungen zwar physikalisch korrekt mit dem Impulsbegriff argumentiert wird, das Newtonsche Kraftkonzept jedoch dabei keine Rolle spielt. Er leitet über zum Standardbeispiel der auf einem Tisch stehenden Büchertasche: Welche Kräfte wirken auf die Tischoberfläche und welche auf die Tasche? Wir haben zur Eignung des Beispiel im Rahmen von Erörterungen des Wechselwirkungsprinzips unter Punkt B.3.3.2.4 einige kritische Anmerkungen gemacht (siehe Seite 313). Das Beispiel wird aber nur kurz angesprochen, weil die Stunde zu Ende geht. Es wird im zweiten Teil unserer Fallstudie wieder aufgegriffen.

Im zweiten Teil der Fallstudie geht es weiterhin um das dritte Newtonsche Axiom. Als Diskussionsgrundlage bringt der Lehrer am folgenden Tag zunächst das Beispiel einer auf einer festen Unterlage stehenden Büchertasche ein und später das Anschieben eines Autos. (Die Numerierung der nicht namentlich benannten Schüleräußerungen beginnt wieder bei S 1.)

Lehrer Nochmal zum Beispiel von gestern: Eine Tasche steht auf dem Tisch. Sie drückt also gegen den Tisch. Drückt der Tisch auch gegen die Tasche?

Albert Ich würde sagen, daß ein bestimmter Bezug da sein muß. Jetzt wird die Erde als Bezugspunkt genommen. Jetzt wird also das, was runterfällt, praktisch der Erde zugeordnet und nicht die Erde dem, was runterfällt. Von daher, würde ich sagen, ist es eigentlich nur zulässig, die Kraft der Tasche zu errechnen, weil das ja bezogen ist auf die Erde. Die Erde wird ja nicht auf die Tasche bezogen.

Lehrer Wir können den Versuch ja nochmal machen. (stellt Aktentasche auf das Pult) Wenn man in einem konkreten Zusammenhang über Kräfte redet, dann muß man sich bei jeder einzelnen Kraft immer ganz genau klarmachen, auf welchen Körper die Kraft wirkt. Ihr meint also alle, die Tischplatte übt auf die Tasche keine Kraft aus?

Schüler (schweigen)

Mit "Kraft der Tasche" meint Albert ihr Gewicht. Aufgrund dieser 'Eigenschaft' drückt die Tasche gegen den Tisch. Wäre keine feste Unterlage da, würde die Tasche 'auf die Erde' fallen. Daher wählt Albert als "Bezugspunkt" die Erde. Die Idee erinnert ein wenig an den "natürlichen Ort" bei Aristoteles (siehe dazu Punkt D.2.1). Von Kräften zu sprechen, die in der umgekehrten Richtung wirken (von der Erde, bzw. dem Tisch auf die Tasche) erscheint Albert nicht angebracht.

Auf das Nachhaken des Lehrers "Ihr meint also alle, die Tischplatte übt auf die Tasche keine Kraft aus?" reagieren die Schüler verunsichert. Sie sagen lieber erstmal gar nichts. Als Schüler weiß man, was solchermaßen gestellte Lehrerfragen andeuten.

Lehrer (legt statt der Tasche nun Reißzwecken auf den Tisch) Durch welche physikalische Größe läßt sich die Reißzwecke in den Tisch drücken?

S 1 Durch eine Kraft in Richtung des Gegenstandes.

Frank Die Reißzwecken bewegen sich ja nicht. Sie stehen also fest und haben einen Druck von unten. Der Tisch leistet ja beim Draufsetzen eines Gegenstandes Widerstand.

Oswald Die Heftzwecken erfahren jetzt die gleiche Kraft, als wenn man sich selber auf den Tisch setzt. Die Heftzwecken werden angezogen. Und wenn man sich selbst auf den Tisch setzt, dann wird man auch angezogen von der Erde. Und jetzt sitzt die Heftzwecke auf dem Tisch und der Tisch verhindert, daß sie zum Erdmittelpunkt gezogen wird. Die Heftzwecken liegen ja in Ruhe.

- Lehrer Was schließen wir daraus, wenn sich ein Körper in Ruhe oder in gleichförmiger Bewegung befindet?
- Frank Daß eine Kraft auf ihn ausgeübt wird, in diesem Falle die Erdanziehungskraft, aber sonst keine Bewegungskraft.
- Sven Sonst würde er ja schweben, wenn keine Kraft da ist.

Die Heftzwecken unterliegen der Erdanziehungskraft genauso wie ein Mensch, der sich auf den Tisch setzt. Sie fallen nicht nach unten, weil der Tisch Widerstand leistet. Frank und Oswald kommen jedoch nicht auf die Idee, diese Widerstands-Leistung des "passiven" Tisches als Ausübung einer Kraft zu konzeptualisieren; das widerspräche dem Aktivitäts-Schema aus Präkonzept 4.

Der Lehrer versucht im folgenden, auf Widersprüche zwischen dem alleinigen Vorhandensein der Erdanziehungskraft und der unbeschleunigten Bewegung zu verweisen. Ein Erkennen des Widerspruchs setzt voraus, daß der Gehalt des zweiten Newtonschen Axioms zu einem das Denken der Schüler wesentlich anleitenden Präkonzept geworden wäre. Es fungiert jedoch auch nach eingehender unterrichtlicher Behandlung der Newtonschen Dynamik eher das Präkonzept 3-2, nachdem in Richtung der Bewegung eine Kraft wirkt. Da die Heftzwecken in Ruhe sind (relativ zum Tisch) wirkt demnach keine "Bewegungskraft" (Frank), wohl aber eine Art Haltekraft. Ohne die Erdanziehungskraft wäre der Körper nach Meinung von Sven, in einem instabilen Zustand: "Er würde schweben".

Die Schüler sehen auch deshalb keinen Anlaß, den sicherlich als Kenntnis vorhandenen Satz ' $F = m \cdot a$ ' auf das Tisch-Beispiel anzuwenden, weil der Sachverhalt mit einfachen lebensweltlichen Erklärungsmustern geklärt werden kann. Die Einbringung des zweiten Axioms in dieser Situation setzte eine "epistemische Intention" voraus (vgl. Seite 129f), d.h. das Bestreben eine allgemeine Theorie zum Zwecke ihrer Vertiefung an immer neuen Beispielen zu testen. Bei der Gestaltung des Physikunterrichts auf der Sekundarstufe II wird ein solches Interesse zu unreflektiert vorausgesetzt. Unsere empirischen Arbeiten haben ergeben, daß bei Schülern eher ein Interesse an spezifischen Aussagen über Einzelphänomene fungiert (Vorverständniselement A11).

Im vorliegenden Fall muß der Lehrer die Schüler sehr direkt auf die Inkonsistenz von $F = F_G$ und $a = 0$ hinweisen:

- Lehrer (wiederholt seine Frage mit Nachdruck) Was schließen wir daraus, wenn sich die Heftzwecken ganz still verhalten? - - Wie sieht es dann mit der Kraft aus?
- Iris Es müßte eigentlich keine Kraft darauf wirken.
- Lehrer Die Kraft müßte Null sein. Und wie kann die Kraft denn nun Null werden? - Die an den Dingen angreift, wenn die Erdanziehungskraft da ist?

Schüler (lange Pause)

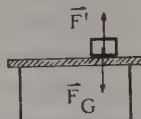
Lehrer Wie kann die Kraft Null sein?

Tom Wenn die sich gegenseitig aufheben.

Lehrer Wenn also was noch da ist?

Tom Wenn also eine Kraft noch in die andere Richtung wirkt.

Lehrer (zeichnet die nebenstehende Skizze) An dieser Heftzwecke muß also eine zweite Kraft angreifen. In welche Richtung muß diese zeigen?



Klaus Nach oben.

Lehrer Und wie groß muß die sein?

Bernd Genauso groß.

Es gelingt dem Lehrer, durch gezielte Impulse die richtigen Aussagen aus den Schülern herauszufragen. Die lange Pause im Anschluß an seine zweite Frage bezeichnet den Zeitraum, in dem die Schüler - in ihrer spontanen Einschätzung des Problems durch das betonte Nachfragen des Lehrers verunsichert - nach neuen Lösungen suchen, bzw. herauszufinden versuchen, worauf der Lehrer hinauswill. Es melden sich andere Schülern (Tom, Klaus, Bernd), die sich an das erinnern, was im Unterricht über Kraft und Beschleunigung gesagt worden war.

Aber es gibt auch Widerspruch:

Oswald Meiner Meinung nach kann nur eine Kraft auf die Heftzwecke wirken, und zwar die Erdanziehung. Der Tisch stellt ja nur ein Hindernis dar. Wenn keine Kraft herrschen würde, dann wäre sie vielleicht gar nicht auf den Tisch gekommen.

S 2 Wenn wir jetzt noch mehr Heftzwecken nehmen würden, dann würden die jetzt doch meinetwegen den Tisch kaputt machen. Die würden also durchfliegen. Und so, wie Sie das gesagt haben, müßten sie ja eigentlich da, wo sie sind, bleiben. Auch wenn der Tisch weg ist.

Lehrer Du meinst also, wir häufen da immer mehr auf, und irgendwann wird der Tisch zusammenbrechen, und nach meiner Theorie müßten sie da plötzlich schweben.

S 2 Ja, genau.

S 3 Aber der Tisch ist doch nun die eigentliche Gegenkraft.

S 4 Wir haben eben gesagt, die Kraft des Tisches in entgegengesetzter Richtung ist genauso groß wie die Erdanziehungskraft. Das heißt für mich, wenn ich den Tisch hochhebe und lasse ihn dann los, dann passiert gar nichts.

Aus der Tafelskizze entnehmen die Schüler, daß neben der Gewichtskraft eine zweite, nach oben gerichtete Kraft im Spiel sein soll, die vom Betrage der Gewichtskraft entspricht. Welchen Charakter die zweite Kraft hat, z.B. von welchem Körper sie ausgeübt wird, ist noch ungeklärt. Oswald hat entsprechend

dem bereits mehrfach angesprochenen Präkonzept 4 Schwierigkeiten mit der Annahme der "passive" Tisch könne die Kraft ausüben. Schüler 2 ordnet die zweite Kraft den Heftzwecken zu und leitet daraus die bewußt absurde Behauptung ab, die Heftzwecken würden auch ohne Tisch da bleiben, wo sie sind. Schüler 4 meint, wenn es die nach oben gerichtete Kraft gäbe, müsse dies eine Eigenschaft/Potenz des Tisches sein, mit der dieser der Erdanziehung widerstehen könne. Allen Argumenten ist gemeinsam, daß die Schüler nicht von einer Kraft ausgehen, die der Tisch auf einen anderen Körper (Heftzwecken) ausübt.

S 5 Man kann z.B. sagen, wenn ein Tisch maximal eine Tonne aushält, dann ist die Gegenkraft genau eine Tonne.

Lehrer Welche Gegenkraft?

S 5 Ja, dieses F' .

Lehrer Wie groß ist denn dieses F' ?

S 5 Dieses F' - genauso groß wie F_G .

Oswald Aber dieses F' kann sich ja nicht nur diesem F_G anpassen. Wenn ich jetzt eine Reißzwecke mehr drauf tue, dann müßte ja logischerweise F' auch größer werden, weil F_G größer geworden ist. Und wenn ich dann wieder eine wegnehme, müßte sich dieses F' auch wieder verkleinern. Das habe ich noch nie gehört, daß sich Kräfte so ohne weiteres verändern können. Das heißt, so wie ich das sehe, müßte die zweite Reißzwecke an die Decke schießen, wenn ich die erste wegnehme.

Man muß Oswalds Äußerungen als versteckten Protest gegen eine "Kraft des Tisches" werten. Die Folgerungen, die Oswald aus einer solchen "Kraft" (wie er sie versteht) zieht, sind bewußt absurd konstruiert. Neben dem Aktivitätsdenken fungiert als Denkraum das Eigenschaftsdenken (Vorverständniselement D5). Wenn man die "Kraft" als Eigenschaft des Tisches ansieht, wäre ihre Variabilität in der Tat verwunderlich.

Schüler 5 meint mit der "Gegenkraft" des Tisches keine Wechselwirkungskraft, die an den Heftzwecken angreift, sondern eine 'innere Kraft', mit der der Tisch seine Stabilität aufrechterhält.

Lehrer Daß sich Kräfte so einfach ändern, ganz so abwegig ist das doch nicht. Stellt euch vor, ich hätte diesen Experimentierwagen auf einen Personenwagen gestellt und ich würde auf den Wagen noch eine Heftzwecke drauflegen, was würde dann passieren?

S 6 Die Waage registriert das. Sie geht weiter nach unten. (...)

(Der Pausengong ertönt. Die weitere Antwort geht in der entstehenden Unruhe unter.)

Frank Also, wenn an dem Wagen nicht irgendeine Kraft herrschen würde, dann würde er garantiert nicht so dastehen, wie er da jetzt rumsteht. Also, wenn da keine Kraft drin wäre, in dem Wagen, dann würde er vielleicht umfallen.

Lehrer Kraft, die in irgendeinem Ding drin ist, gibt es für uns nicht, weil es nicht definiert ist. Es gibt nur die Kraft, die ein Körper erfährt.

Frank wiederholt hier seine Vorstellung von der Notwendigkeit einer Haltekraft (vgl. Seite 537). Die Gewichtskraft wird nicht in einen Zusammenhang mit einer potentiellen Beschleunigungswirkung gebracht, sondern als Kraft betrachtet, die zusammen mit dem "Widerstand" des Tisches den Körper stabilisiert. Minstrell (1982, 2f) berichtet über ähnliche Erklärungen des Ruhezustands von Körpern.

Nach der Pause wird als neues Beispiel auf dem Wege zum Wechselwirkungsprinzip der Vorgang des Anschiebens eines Autos behandelt. Wir zitieren eine längere Passage im Zusammenhang, in der sich die bisherigen Grundzüge der Schülerausagen fortsetzen.

Lehrer Jetzt übt also dieser Mensch eine Kraft auf den Wagen aus. (zeichnet untenstehende Skizze) Wir können ja mal irgendeinen Betrag nehmen, z.B. 100 Newton. Und jetzt behaupte ich, daß der Wagen entsprechend auf den Menschen selbst eine Kraft von 100 Newton ausübt. Jetzt ist die Frage: Warum bewegt sich das Auto überhaupt nach vorne? - Wieso soll da jetzt überhaupt etwas passieren?



Rainer Wir hatten ja gestern gesagt, daß es wahrscheinlich die Trägheit eines Körpers ist - daß das die Kraft ist, die praktisch entgegenwirkt.

Tom Ich nehme an, daß es immer nur dann geht, wenn sich irgendwelche Körper in Ruhe befinden. Wenn die sich jetzt bewegen, muß ja immer irgendeine Kraft größer werden als die andere, damit die sich bewegen. Wenn der Mann jetzt an dem Auto anfaßt, dann übt er eine Kraft aus. Die Kraft von dem Auto bleibt dann immer gleich. Und wenn der Mann jetzt drückt, dann wird die Kraft von ihm größer, und das Auto fängt an zu rollen.

Lehrer Ihr meint also, das mit den gleichen Kräften, das sei nur so eine Anfangsbedingung, solange der Wagen noch nicht rollt. Aber sobald das Auto in Gang kommt, ist F größer. - Ich behaupte aber gerade, daß die Kräfte für jeden Zeitpunkt vollkommen identisch sind.

Ulf Es hat doch jeder Gegenstand einen Maximalbetrag.

Lehrer Was ist das?

Ulf Ja, irgendwann muß er ja rollen können. Gegen irgendeine Kraft kann sich der Gegenstand ja nicht mehr stellen.

Lehrer Du meinst also die Kraft, die notwendig ist, um den Wagen in Bewegung zu setzen. Ich will jetzt nochmal die Bemerkung machen, daß man beim Verhalten von Körpern - bewegen sie sich, bleiben sie in Ruhe, werden sie beschleunigt, usw. - immer alle Kräfte angucken muß, die auf den betreffenden Körper einwirken. Welche Kräfte wirken auf ein Auto, wenn man dahintersteht und schiebt?

Oswald Ich wollte erstmal fragen, wie Ihre Sache denn nun überhaupt aussieht? Nehmen wir mal an, wir haben ein Brett, und das bricht nun durch.

Da tritt jemand drauf, und das bricht durch. Dann heißt das also, die Gegenkraft konnte nicht mehr aufgebracht werden, oder? Dann stimmt das, was Sie eben gesagt haben, doch irgendwie auch nicht.

Lehrer Wenn ein Körper A auf den Körper B einwirkt, dann auch B auf A. Wenn das Brett jetzt aber nicht mehr einwirkt - (wird von Oswald unterbrochen)

Oswald Ja, warum bricht es dann durch? Weil es die Kraft nicht mehr aufbringt, oder was?

Lehrer Das Brett hat doch eine maximale Belastung, und danach bricht es durch.

Ulf Die maximale Belastung ist also die Grenze -

Iris Bei unserem Beispiel mit dem Tisch - wenn man da also ganz viele Heftzwecken drauflegt, kann das sein, daß der Tisch irgendwann durchbricht. So ist es auch beim Auto. Die Kraft wird immer stärker und irgendwann kann es nicht mehr standhalten und dann läuft es eben.

Damit schließen wir die Protokollauszüge zu Fallstudie 3 ab.

Bei den Schülern fungieren die Denkraumen D5 "Eigenschaftsdenken", D6 "Verursacher-Fixierung/Aktivitätsdenken", D7 "Zweckdenken". Der Kommunikationskonflikt zwischen Lehrer und Schülern beruht im wesentlichen darauf, daß die Schüler unter "Gegenkraft" keine relationale Wechselwirkungskraft verstehen, die an einem anderen Körper angreift, sondern eine Kraft des Körpers, mit der er sich gegen eine angreifende Kraft wehrt ("Trägheit", Stabilität). Diese Gegenkraft hat einen maximalen Wert (maximale Widerstandsfähigkeit). Wird die angreifende Kraft "stärker" als diese Gegenkraft, so muß der Körper nachgeben, und es zeigt sich eine Wirkung (Bewegung, Zerstörung des Körpers). (Schüler, die das dritte Newtonsche Axiom im Unterricht kennengelernt haben, beschränken seine Gültigkeit häufig auf den Zustand der relativen Ruhe.) Die Schüler unterscheiden zwischen dem aktiven Beweger und dem passiven Auto. Das macht es ihnen schwer, dem Auto eine Kraftausübung auf den Beweger zuzusprechen, die der Kraftausübung des Bewegers auf das Auto gleichberechtigt wäre. Der Zweck des Vorgangs liegt im Anschieben, also rücken die Einwirkungen auf das Auto ins Blickfeld, nicht etwaige Einwirkungen auf den Beweger.

Literatur

- Arens 1981
Arens, L.
Zur Rolle der Uhr für die Entwicklung der klassischen Mechanik und der mechanischen Naturauffassung
1. Staatsexamensarbeit, Universität Bremen 1981
- Arons 1981
Arons, A.B.
Thinking, reasoning and understanding in introductory physics courses
In: The Physics Teacher, 19 (1981), 166-172
- Aufschnaiter 1983
Aufschnaiter, S.v.
Spielorientierung, ein neues Unterrichtskonzept?
In: Mikeklskis, H.: Zur Didaktik der Physik und Chemie
Ailsbach: Leuchtturm 1983, 64-70
- Autorengruppe WIP
Autorengruppe "Wissenschaftstheoretisch orientierter Physikunterricht"
Wissenschaftstheorie im Physikunterricht
vervielfältigter Projektbericht, Universität Bremen 1980
- Baumgart 1980
Baumgart, U./Krüger, U.-H.
Orientierung von Physikunterricht der Sekundarstufe II an wissenschaftstheoretischen Problemen - Untersuchung des Ist-Zustands in ausgewählten Bereichen und Schlussfolgerungen
1. Staatsexamensarbeit, Universität Bremen 1980
- Baumgart 1982
Baumgart, U./Krüger, U.-H./Niedderer, H./Schecker, H.
Übersicht über wichtige wissenschaftstheoretische Fragestellungen und Positionen
in: Der Physikunterricht, 16 (1982), 5-20
- Bayer 1983
Bayer, H.-J.
Die Entdeckung des ersten Elementarteilchens - Eine historisch-genetische Darstellung
2. Staatsexamensarbeit, Neu Isenburg 1983
- Benninghaus 1982
Benninghaus, H.
Deskriptive Statistik
Stuttgart: Teubner 1982
- Berger 1981
Berger, P.
Philosophische Grundgedanken der Physik
Stuttgart: Metzler 1981
- Bernal 1970
Bernal, J.D.
Sozialgeschichte der Wissenschaften, Bd. I-4
Reinbek: Rowohlt 1970
- Bethge 1978
Bethge, T./Janssen, W.
Didaktische Analyse des Unterrichtsthemas Kernenergie in der Sekundarstufe I unter Berücksichtigung empirischer Erhebungen des Vorverständnisses von Schülern
1. Staatsexamensarbeit, Universität Bremen 1978
- Blumenberg 1980
Blumenberg, H.
Galileo Galilei: Sidereus Nuncius, Dialog über die Weltsysteme, Vermessung der Hölle Dantes, Marginalien zu Tasso
Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1980
- Böhme 1981
Böhme, G.
Die Verwissenschaftlichung der Erfahrung - Wissenschaftsdidaktische Konsequenzen
in: Duit 1981, 85-113
- Bollnow 1975
Bollnow, O.F.
Das Doppelgesicht der Wahrheit - Philosophie der Erkenntnis, Teil 2
Stuttgart: Kohlhammer 1975
- Breger 1982
Breger, H.
Die Natur als arbeitende Maschine - Zur Entstehung des Energiebegriffs in der Physik 1840-50
Frankfurt a.M.: Campus 1982
- Brown 1977
Brown, H.J.
Perception, Theory and Commitment - The New Philosophy of Science
Chicago: Precedent 1977
- Carnap 1959
Carnap, R./Stegmüller, W.
Induktive Logik und Wahrscheinlichkeit
Wien: Springer 1959
- Carnap 1966
Carnap, R.
Philosophical Foundations of Modern Physics
New York: Basic Books 1966
- Carroll 1963
Carroll, J.B.
Linguistic Relativity and Language Learning
in: Corder, P.S./Allen, J.P.B.: Edinburgh Course in Applied Linguistics
London: Oxford University Press 1963, 126-144
- Campagne 1980
Champagne, A./Klopfer, L./Anderson, J.
Factors influencing learning of classical mechanics
in: American Journal of Physics, 48 (1980), 1074-1079
- Child 1970
Child, D.
Factor Analysis
London: Holt, Rinehard, Winston 1970
- Clauss 1977
Clauss, G./Ebner, H.
Grundlagen der Statistik für Psychologen, Pädagogen und Soziologen
Frankfurt a.M.: Deutsch 1977
- Clement 1982
Clement, J.
Student preconceptions in introductory mechanics
in: Am. Journal of Physics, 50 (1982), 66-71
- Cohen 1981
Cohen, B.
The Birth of a New Physics
New York: Anchor Books 1981
- Crombie 1977
Crombie, A.
Von Augustinus bis Galilei - Die Emanzipation der Naturwissenschaft
München: DTV 1977
- Driver 1973
Driver, R.
The Representation of Conceptual Frameworks in Young Adolescent Science Students
Ph.D. thesis, University of Illinois 1973

- Driver 1984
Driver, R.
Cognitive psychology and pupil's frameworks in mechanics
Vortrag gehalten auf der GIREF-Tagung in Utrecht, August 1984; ausgearbeitetes Manuskript
- Düring 1887
Düring, E.
Principien der Mechanik
Leipzig: Fues's 1887
- Duit 1981
Duit, R./Jung, W./Pfundt, H.
Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht
Köln: Aulis 1981
- Duit 1983
Duit, R.
Energy conceptions held by students and consequences for science teaching
in: Helm 1983, 334-340
- Duit 1984
Duit, R.
Kraft, Arbeit, Leistung, Energie - Wörter der Alltagssprache und der physikalischen Fachsprache
in: *physica didactica*, 11 (1984), 129-144
- Einstein 1979
Einstein, A.
Aus meinen späten Jahren
Stuttgart: DVA 1979
- Elkana 1974
Elkana, Y.
The Discovery of Conservation of Energy
London: Hutchinson 1974
- Feyerabend 1974
Feyerabend, P.
Kuhns Struktur wissenschaftlicher Revolutionen - ein Trostbüchlein für Spezialisten?
in: Lakatos 1974, 191-222
- Feyerabend 1976
Feyerabend, P.
Wider den Methodenzwang - Skizzen einer anarchistischen Erkenntnistheorie
Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1976
- Feyerabend 1980
Feyerabend, P.
Erkenntnis für freie Menschen
Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1980
- Galilei 1630
Galilei, G.
'Dialog' - Dialog über die Weltsysteme
in: Blumenberg 1980
(Originalausgabe 1630)
- Galilei 1637
Galilei, G.
'Discorsi' - Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend
Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1973
(Originalausgabe 1637/38)
- Galilei 1960
Galilei, G.
De Motu - On Motion
Madison: University of Wisconsin 1960
- Geßmann 1982
Geßmann, S./Jaisli, W.
Schülermitbestimmung bei der Planung, Durchführung und Auswertung einer Unterrichtseinheit Magnetismus
2. Staatsexamensarbeit, Bremen 1982
- Gilbert 1982
Gilbert, J.K./Osborne, R.J./Fensham, P.H.
Children's science and its consequences for teaching
in: *Science Education*, 66 (1982), 623-633
- Gipper 1971
Gipper, H.
Denken ohne Sprache?
Düsseldorf: Schwann 1971
- Gleich 1982
Gleich, A.v.
Störfaktoren und Nebenwirkung - Ein Versuch aus der Kritik der harten Naturwissenschaften alternative Ansätze zu entwickeln
Vortrag gehalten auf der Tagung "Ökologisch orientierte Wissenschaft" in Loccum, November 1982, ausgearbeitetes Manuskript
- Goehring 1979
Goehring, D.G.
Medieval science and the origin of Galileo's principle of inertia
in: *School Science and Mathematics*, 79 (1979), 151-157
- Habermas 1979a
Habermas, J.
Technik und Wissenschaft als "Ideologie"
Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1979
- Habermas 1979b
Habermas, J.
Erkenntnis und Interesse
Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1979
- Hauff 1972
Hauff, J./Heller, A./Hüppauf, B./Köhn, L./Philippi, K.-P.
Methodendiskussion - Arbeitsbuch zur Literaturwissenschaft, Bd. 2
Frankfurt a.M.: Athenäum 1972
- Heidegger 1977
Heidegger, M.
Sein und Zeit
Frankfurt a.M.: Klostermann 1977
- Heidelberger 1981
Heidelberger, M./Thiessen, S.
Natur und Erfahrung - Von der mittelalterlichen zur neuzeitlichen Naturwissenschaft
Reinbek: Rowohlt 1981
- Heller 1970
Heller, B.
Grundbegriffe der Physik im Wandel der Zeit
Braunschweig: Vieweg 1970
- Helm 1983
Helm, H./Novak, J.D.
Proceedings of the International Seminar 'Misconceptions in Science and Mathematics' (June 1983)
Ithaca: Cornell University 1983
- Herivel 1965
Herivel, J.
The Background to Newton's Principia
Oxford: Clarendon 1965
- Hermann 1970
Hermann, A.
Der Kraftbegriff bei Faraday und seine historische Wurzel (2 Teile)
in: *Physikalische Blätter*, 26 (1970), 247-252 und 298-301
- Hermann 1972
Hermann, A.
Lexikon Geschichte der Physik
Köln: Aulis 1972

- Holton 1970
Holton, G./Rutherford, F.J./Watson, F.G.
The Project Physics Course - Text
New York: Holt, Rinehart, Winston 1970
- Holzkamp 1968
Holzkamp, K.
Wissenschaft als Handlung
Berlin: de Gruyter 1968
- Hörz 1968
Hörz, H./Löther, R./Wollgast, S.
Philosophie und Naturwissenschaften - Wörterbuch
zu den philosophischen Fragen der Naturwissenschaften
Berlin: Deben 1968
- Hund 1978
Hund, F.
Geschichte der physikalischen Begriffe, Bd. I
Mannheim: BI 1978
- Jaisli 1980
Jaisli, W./Minuth, P./Schäfer, M./Spannhake, U.
Wissenschaftstheorie und Physikunterricht
in: physica didactica, 7 (1980), 71-84
- Jammer 1957
Jammer, M.
Concepts of Force
Cambridge, Mass: University Press 1957
- Jankowitz 1975
Jankowitz, W.-G.
Philosophie und Vorurteil
Meisenheim: Hain 1975
- Joerger 1980
Joerger, K.
Lernanreize
Königstein: Scriptor 1980
- Jung 1970
Jung, W.
Beiträge zur Didaktik der Physik
Frankfurt a.M.: Diesterweg 1970
- Jung 1978
Jung, W.
Zum Problem der "Schülvorstellungen"
in: physica didactica, 5 (1978), 125-146
- Jung 1979a
Jung, W.
Aufsätze zur Didaktik der Physik und Wissenschaftstheorie
Frankfurt a.M.: Diesterweg 1979
- Jung 1979b
Jung, W./Wiesner, H.
Zur Definition fachdidaktischer Probleme am Beispiel der Mechanik
in: physica didactica, 6 (1979), 201-216
- Jung 1979c
Jung, W.
Optik für die Sekundarstufe I
Frankfurt a.M.: Diesterweg 1979
- Jung 1980a
Jung, W.
Ist elementarisiert Physikunterricht noch zeitgemäß?
in: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 33 (1980), 469-477
- Jung 1981a
Jung, W./Wiesner, H./Engelhard, P.
Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik
Bad Salzdetfurth: Franzbecker 1981
- Jung 1981b
Jung, W./Wiesner, H.
Verständnisschwierigkeiten beim physikalischen Kraftbegriff - Eine Untersuchung zum Kraftbegriff bei Physikstudenten
in: Physik und Didaktik, 9 (2/1981), 111-122
- Jung 1981c
Jung, W.
Lebensweltliche und wissenschaftliche Vorstellungen
in Duit 1981, 64-84
- Jung 1981d
Jung, W.
Erhebungen von Schülvorstellungen in Optik
in: physica didactica, 8 (1981), 137-153
- Jung 1982a
Jung, W.
"Der naturwissenschaftliche Unterricht und die Technologien der achtziger Jahre" - Bemerkungen zur Jahrestagung der GDGP in Berlin (1981)
in: physica didactica, 9 (1982), 52-55
- Jung 1983
Jung, W.
Informationsverarbeitende Prozesse beim Physiklernen
Vortrag gehalten auf der MNU-Regionaltagung in Bremerhaven, September 1983
- Kant 1976
Kant, I.
Kritik der reinen Vernunft
Hamburg: Meiner 1976
- Keller 1982
Keller, A.
Allgemeine Erkenntnistheorie
Stuttgart: Kohlhammer 1982
- Krieger 1976
Krieger, R.
Determinanten der Wißbegier
Bern: Huber 1976
- Krüger 1982
Krüger, U.-H./Schecker, H.
Das Bild von der Wissenschaft Physik - Ergebnisse empirischer Untersuchungen zu wissenschaftstheoretischen Fragestellungen bei Schülern und Lehrern der Sekundarstufe II
in: Der Physikunterricht, 16 (1982), 78-82
- Kuhn 1974
Kuhn, T.S.
Bemerkungen zu meinen Kritikern
in: Lakatos 1974, 223-270
- Kuhn 1976
Kuhn, T.S.
Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen
Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1976
- Kuhn 1978
Kuhn, T.S.
Die Entstehung des Neuen
Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1978
- Kuhn 1978a
Kuhn, T.S.
Logik oder Psychologie der Forschung?
in: Kuhn 1978, 357-388
- Kuhn 1978b
Kuhn, T.S.
Neue Überlegungen zum Begriff des Paradigma
in: Kuhn 1978, 389-420

Künzli 1982

- Künzli, R.
Von sinnlichen Vorstellungen zu deutlichen Begriffen
Vortrag gehalten auf dem IPN-Seminar "Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht" in Kiel, September 1982
ausgearbeitetes Vortragsmanuskript, Kiel 1982

Künzli 1985

- Künzli, R.
Können wir mehr wissen? Anmerkungen zum Methodenproblem der Naturwissenschaftsdidaktik in: Mikelskis, H.: Zur Didaktik der Physik und Chemie
Alsbach: Leuchtturm 1985, 54-70

Kuznecov 1970

- Kuznecov, B.G.
Von Galilei bis Einstein - Entwicklung der physikalischen Ideen
Braunschweig: Vieweg 1970

Lakatos 1974

- Lakatos, I./Musgrave, A.
Kritik und Erkenntnisfortschritt
Braunschweig: Vieweg 1974

Lakatos 1974a

- Lakatos, I.
Falsifikation und die Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme
in Lakatos 1974, 89-190

Lakatos 1974b

- Lakatos, I.
Die Geschichte der Wissenschaft und ihre rationalen Rekonstruktionen
in Lakatos 1974, 271-312

Leboutet-Barrell 1976

- Leboutet-Barrell, L.
Concepts of mechanics among young people
in: Physics Education, 11 (1976), 462-466

Leont'ev 1971

- Leont'ev, A.A.
Sprache, Sprechen, Sprechfähigkeit
Stuttgart: Kohlhammer 1971

Lind 1975

- Lind, G.
Sachbezogene Motivation im naturwissenschaftlichen Unterricht
Weinheim: Beltz 1975

Lind 1979

- Lind, G.
Typen des Experiments im naturwissenschaftlichen Unterricht, dargestellt anhand von Th.S. Kuhns Modell der wissenschaftlichen Forschung
in: Praxis der Naturwissenschaften, 28 (1979), 281-288

Lind 1982

- Lind, G.
The structure of interests in physics
in: European Journal of Science Education, 4 (1982), 275-283

Lorenzen 1974

- Lorenzen, P.
Konstruktive Wissenschaftstheorie
Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1974

Mach 1883

- Mach, E.
Erkenntnis und Irrtum - Skizzen zur Psychologie der Forschung
Leipzig: Barth 1917
(Erstausgabe 1883)

Maichle 1985

- Maichle, U.
Wissen, Verstehen und Problemlösen im Bereich der Physik
Frankfurt a.M.: Lang 1985

McCloskey 1983

- McCloskey, M.
Irrwege der Intuition in der Physik
in: Spektrum der Wissenschaft, Juni 1983, 88-99

McDermott

- McDermott, L.C.
Research on conceptual understanding in mechanics
in: Physics Today, July 1984, 24-32

Mikelskis 1979

- Mikelskis, H.
Zum Verhältnis von Physik und Lebenswelt im Physikunterricht - dargestellt am Thema Kernkraftwerke
Dissertation, Universität Bremen 1979

Minstrell 1982

- Minstrell, J.
Explaining the "at rest" condition of an object
in: The Physics Teacher, 20 (1982), 10-14

Newton 1963

- Newton, I.
Mathematische Prinzipien der Naturlehre
Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1963
(Originalausgabe 1686)

Niederer 1975

- Niederer, H.
Didaktische Sachstruktur-Analyse - theoretischer Ansatz und Beispiele aus der Elektronik
in: Dahnke, H.: Zur Didaktik der Physik und Chemie
Hannover: Schroedel 1975, 21-33

Niederer 1982

- Niederer, H.
Unterschiedliche Interpretationen des Photoeffekts
Eine historisch-wissenschaftstheoretische Fallstudie
in: Der Physikunterricht, 16 (2/1982), 39-46

Niederer 1982a

- Niederer, H./Schecker, H.
Ziele und Methodik eines wissenschaftstheoretisch orientierten Physikunterrichts
in: Der Physikunterricht, 16 (1982), 58-71

Niederer 1982b

- Niederer, H.
Probleme der Lebenswelt, Vorverständnis der Schüler und Wissenschaftstheorie der Physik als Determinanten für den Physikunterricht
in: Fischler, H.: Lehren und Lernen im Physikunterricht
Köln: Aulis 1982, '05-132

Osborne 1983

- Osborne, R.J./Witrock, M.C.
Learning science: a generative process
in: Science Education, 67 (1983), 489-508

Osborne 1983a

- Osborne, R.J./Bell, B.F./Gilbert, J.K.
Science teaching and children's views about the world
in: European Journal of Science Education, 5 (1983), 1-14

Pfundt 1985

- Pfundt, H./Duit, R.
Bibliographie: Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht
Kiel: IPN 1985

- Planck 1931
Planck, M.
Positivismus und reale Außenwelt
Leipzig: Akad. Verlagsanstalt 1931
- Popper 1969
Popper, K.
Logik der Forschung
Tübingen: Mohr 1969
- Popper 1974
Popper, K.
Die Normalwissenschaft und ihre Gefahren
in Lakatos 1974, 51-58
- Prigogine 1980
Prigogine, I./Stengers, I.
Dialog mit der Natur
München: Piper 1980
- Pukies 1979
Pukies, J.
Das Verstehen der Naturwissenschaften
Braunschweig: Westermann 1979
- Pukies 1979a
Pukies, J.
Ist das Reich der Vorstellung revolutioniert, so
hält die Wirklichkeit nicht aus (Hegel) oder: Kann
die Wissenschaftstheorie dem Lehrer helfen, einen
besseren Unterricht zu machen?
in: Ewers, M.: Wissenschaftstheorie und Natur-
wissenschaftsdidaktik
Bad Salzderfurth: Franzbecker 1979, 129-146
- Redeker 1978
Redeker, B.
Untersuchungen zur Begriffsbildung im natur-
wissenschaftlichen Unterricht
Dissertation, Universität Bielefeld 1978
- Redeker 1981
Redeker, B.
Zur Bedeutung des Vorverständnisses für das
Lernen von Physik
in: physica didactica, 8 (1981), 107-120
- Rhöneck 1983
Rhöneck, C.v.
Der Geschwindigkeitsbegriff von Fünftklässlern
und didaktische Hilfen auf dem Weg zu $v = s/t$
in: DPG, FA Didaktik der Physik: Vorträge auf
der Frühjahrstagung 1983
Gießen 1983, 232-237
- Rosenberger 1895
Rosenberger, F.
Isaac Newton und seine physikalischen Principien
Leipzig: Barth 1895
- Rost 1980
Rost, J.
Gedächtnispsychologische Grundlagen naturwissen-
schaftlichen Wissens
Weinheim: Beltz 1980
- Samburski 1978
Samburski, S.
Der Weg der Physik
München: DTV 1978
- Schaefer 1980
Schaefer, G.
Der Beitrag des Biologieunterrichts zur Entwick-
lung eines Energiebewußtseins
Vortrag auf der MNU/SIL-Tagung "Weltproblem
Energie" in Koblenz, März 1980; Manuskript
- Schäfer 1984
Schäfer, K.
Von der Alltagserfahrung zur Newtonschen
Mechanik
in: physica didactica, 11 (1984), 197-203
- Schaff 1973
Schaff, A.
Ethnolinguistics: The Sapir-Whorf Hypothesis
in: Language and Cognition
New-York: McGraw-Hill 1973, 55-77
- Schecker 1982
Schecker, H.
Das Bild von den Naturwissenschaften - Ein
Beitrag zur Diskussion um die Technikfeindlich-
keit der Jugend
in: Härtel, H.: Zur Didaktik der Physik und
Chemie
Aalsbach: Leuchtturm 1982, 120-122
- Schecker 1983
Schecker, H.
Vorstellungen von Schülern der Sekundarstufe II
über die Wissenschaft Physik und Interessenstruk-
tur im Themenbereich Mechanik - Auswertungs-
bericht über eine Befragung zu Beginn des Schul-
jahres 1983/84
Arbeitsbericht, Universität Bremen 1983
- Schecker 1983a
Schecker, H.
Erfahrungen mit einem am Schülervorverständnis
orientierten Physikunterricht
in: Mikelskis, H.: Zur Didaktik der Physik und
Chemie
Aalsbach: Leuchtturm 1983, 150-152
- Schecker 1984
Schecker, H.
Das Verständnis zentraler Begriffe der klassischen
Mechanik bei Schülern der Sekundarstufe II -
Auswertungsbericht über eine Befragung nach
Abschluß des Mechanik-Kurses im Schulhalbjahr 11/I
Arbeitsbericht, Universität Bremen 1984
- Schecker 1984a
Schecker, H.
Eigenständige Schülerlernprozesse in Mechanik
in: DPG, FA Didaktik der Physik: Vorträge auf
der Physikertagung 1984
Gießen 1984, 179-184
- Schenk 1982a
Schenk, B./Hasler, N./Nothold, K./Thol, K.
Evaluation des doppeltqualifizierenden Bildungs-
gangs "Technischer Assistent für Physik/Allge-
meine Hochschulreife
Münster: WBK Eigendruck 1982
- Schenk 1982b
Schenk, B.
Was verstehen Schüler unter dem Begriff der
Energie
in: Härtel, H.: Zur Didaktik der Physik und
Chemie
Aalsbach: Leuchtturm 1982, 132-135
- Schenk 1983
Schenk, B.
Entwicklung von Schülertheorien zur Mechanik in
der Sekundarstufe II
Vortrag gehalten auf der Jahrestagung der GDGP
in Siegen, September 1983; Vortragsmanuskript
- Schenk 1984
Schenk, B.
Entwicklung von Schülertheorien zur Mechanik in
der Sekundarstufe II
in: physica didactica, 11 (1984), 113-125
- Schwab 1972
Schwab, J.J.
Die Struktur der Wissenschaften: Sinn und
Bedeutung
in: Ford, G.W./Pugno, L.: Wissensstrukturen und
Curriculum
Düsseldorf: Schwann 1972, 27-54

Sexl 1982

- Sexl, R.U.
Aristoteles und die moderne Physik -
Vom Denken zum Experiment
in: Bild der Wissenschaft, Mai 1982, 116-128

Simonis 1974

- Simonis, W.
Der verständige Umgang mit der Welt
Amsterdam: Rodopi 1974

Solomon 1983

- Solomon, J.
Is physics easy?
in: Physics Education, 18 (1983), 155-160

Steiner 1983

- Steiner, I.
Interessengeleitetes Lernen
München: Ehrenwirth 1983

Thoreau 1854

- Thoreau, H.D.
Walden
New York: Signet 1960
(Originalausgabe 1854)

Todt 1978

- Todt, E.
Das Interesse - Empirische Untersuchungen zu
einem Motivationskonzept
Bern: Huber 1978

Toulmin 1969

- Toulmin, S.
Einführung in die Philosophie der Wissenschaft
Göttingen: Vandenhoeck 1969

Toulmin 1978

- Toulmin, S.
Kritik der kollektiven Vernunft
Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1978

Trowbridge 1980

- Trowbridge, D.E./McDermott, L.C.
Investigation of student understanding of the
concept of velocity in one dimension
in: Amer. Journal of Physics, 48 (1980), 1020-28

Trowbridge 1981

- Trowbridge, D.E./McDermott, L.C.
Investigation of student understanding of the
concept of acceleration
in: Amer. Journal of Physics, 49 (1981), 242-253

Varchim 1981

- Varchim, J./Radkau, J.
Kraft, Energie und Arbeit - Energie und Gesellschaft
Reinbek: Rowohlt 1981

Viennot 1979

- Viennot, L.
Spontaneous reasoning in elementary dynamics
in: European Journal of Science Education, 1
(1979), 205-221

Wagenschein 1973

- Wagenschein, M./Banholzer, A./Thiel, S.
Kinder auf dem Weg zur Physik
Stuttgart: Klett 1973

Wagenschein 1980

- Wagenschein, M.
Physikalismus und Sprache
in: Schaefer, G./Loch, W.: Kommunikative Grundlagen
des naturwissenschaftlichen Unterrichts
Weinheim: Beltz 1980, 11-37

Warren 1979

- Warren, J.W.
Understanding Force
London: Murray 1979

Watts 1983

- Watts, D.M.
A study of schoolchildren's alternative frameworks of the concept of force
in: European Journal of Science Education, 5
(1983), 217-230

Wehrle-Eggers 1967

- Wehrle, H./Eggers, H.
Deutscher Wortschatz
Stuttgart: Klett 1967

Weltner 1980

- Weltner, K. et. al.
Interest of intermediate-level secondary students in physics and technology
in: European Journal of Science Education, 2
(1980), 183-189

Westfall 1977

- Westfall, R.S.
The Construction of Modern Science
Cambridge: University Press 1977

Westphal 1981

- Westphal, W.
Mechanik und Verkehrssicherheit, Materialien zu und aus einer Erprobung eines Physik-Grundkurses
Kiel: IPN 1981

Whitaker 1983

- Whitaker, R.J.
Aristotle is not dead: Student understanding of trajectory motion
in: Amer. Journal of Physics, 51 (1983), 352-357

Whorf 1963

- Whorf, B.L.
Denken, Sprache, Wirklichkeit
Reinbek: Rowohlt 1963

Wolff 1971

- Wolff, M.
Fallgesetz und Massebegriff - Zwei wissenschaftstheoretische Untersuchungen zur Kosmologie des Johannes Philoponus
Berlin: de Gruyter 1971

Wolff 1978

- Wolff, M.
Geschichte der Impetustheorie
Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1978

Zietz 1963

- Zietz, K.
Kind und physische Welt
München: Kösel 1963

Liste der verwendeten Abkürzungen

Abkürzungen im Zusammenhang mit schriftlichen empirischen Tests:

ATB	Assoziationstest "Bewegung" (siehe Seite 110)
ATK	Assoziationstest "Kraft" (S. 110)
DAM	Denkaufgaben zur Mechanik (S. 104ff)
BI bis B8	Aufgaben des Tests DAM
DTK	Definitionstest "Kraft" (S. 111)
ITM	Interessenstruktur im Themenbereich Mechanik (S. 104ff)
I1 bis I71	Items des Tests ITM
BI1 bis BI71	mittlere Bewertungen der Items des Tests ITM (Beliebtheitsindizes)
BI1* bis BI6*	mittlere Bewertungen von 6 ermittelten Faktoren zum Test ITM
BI1 bis BI6	gewogene mittlere Bewertungen der 6 Faktoren
MdP	Methodik der Physik (S. 117f)
VWP	Vorstellungen über die Wissenschaft Physik (S. 106f)
A1 bis A8	Items im Test VWP

Abkürzungen im Zusammenhang mit Wortprotokollen (siehe auch S. 99f):

S 1, S 2	Schüler 1, Schüler 2 usw. (namentlich nicht identifiziert)
Schüler	mehrere Schüler äußern sich gleichzeitig (z.B. in Zwischenrufen)
...	Lücke im Wortprotokoll aufgrund mangelnder technischer Qualität des Tonbandmitschnitts
(...)	Auslassungen in Wiedergaben von Wortprotokollen zu Kürzungszwecken
-	
- -	Pausen unterschiedlicher Länge in Unterrichtsgesprächen
- - -	

Abkürzungen von Elementen des thematischen Vorverständnisses zur Mechanik:
(Erläuterungen zu den Kategorien auf Seite 22f, zu den Inhalten auf Seite 340ff)

AI1 bis AI4	Allgemeine Interessen
D1 bis D10	Denkraum
E1, E2	Erfahrungen
K1	Kenntnis
P1 bis P6	Präkonzepte
SI1	Spezifisches Interesse

Weitere Abkürzungen:

GK	Grundkurs an einer gymnasialen Oberstufe
LK	Leistungskurs an einer gymnasialen Oberstufe
SVU	<u>S</u> chüler <u>v</u> orverständnisorientierter <u>U</u> nterricht (S. 515)

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Physik der Universität Bremen.

Herrn Prof. Dr. H. Niedderer danke ich für die intensive und motivierende Betreuung. Die gemeinsamen Gespräche haben wesentlich zum Fortgang der Forschungsarbeiten beigetragen. Sein persönliches Engagement für das Gelingen dieser Arbeit war stets verbunden mit der Gewährung eines hohen Maßes an Freiräumen, in denen ich mich entfalten konnte.

Herrn Prof. Dr. St. v. Aufschnaiter danke ich für die wohlwollende Unterstützung meiner Arbeiten. Ich habe aus vielen kritischen Diskussionen Anregungen für die Reflexion der eigenen Ideen mitgenommen.

Die Durchführung der empirischen Untersuchungen wäre ohne die tatkräftige Unterstützung durch Lehrer an gymnasialen Oberstufen in Bremen und Niedersachsen nicht möglich gewesen. Stellvertretend möchte ich Herrn Th. Bethge, Herrn G. Flor, Herrn Dr. E. Heidbreder und Herrn E. Mumme nennen.

Mein besonderer Dank gilt den vielen Schülern, die mit der Protokollierung ihrer Aussagen und Handlungen im Physikunterricht einverstanden waren und die in anerkennenswerter Weise bei den schriftlichen Befragungen und Interviews mitgearbeitet haben.

Lebenslauf

17. Juli 1955	Geboren in Bremen
April 1962 - Mai 1974	Besuch der Grundschule und eines mathematisch-naturwissenschaftlichen Gymnasiums in Bremen
Mai 1974	Abitur
Juli 1974 - Juni 1976	Soldat auf Zeit bei der Bundesluftwaffe, eingesetzt als Sprachausbilder an der Bundeswehr-Sprachenschule in Appen
Okt. 1976 - April 1981	Studium der Fächer Physik und Englisch für das Lehramt an öffentlichen Schulen (Sekundarstufe II)
April 1981	I. Staatsexamen
Juli 1981 - Aug. 1985	Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Physik/Elektrotechnik der Universität Bremen; Forschungsgebiet: Didaktik des Faches Physik an gymnasialen Oberstufen (Projekt "Wissenschaftstheoretisch orientierter Physikunterricht - WITOP"); Durchführung von Praktika in der Grundausbildung von Lehrer- und Diplomstudenten
seit August 1985	Studienreferendar am Wissenschaftlichen Institut für Schulpraxis in Bremen

